

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química



Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Ingeniero Químico

Título: Propuesta de optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca para obtener alimento animal proteico.

Autor: Gabriel Gutierrez Martínez

Tutores:

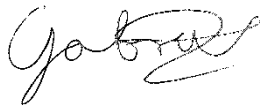
- Ing. Roberto Real Reyes
- Ing. Ena de los Ángeles Hernández López, MSc.

Matanzas,
2021
Cuba

Declaración de autoridad

Yo, Gabriel Gutierrez Martínez, me declaro como único autor de este trabajo de diploma “Propuesta de optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca para obtener alimento animal proteico”, realizado en la Universidad de Matanzas sede “Camilo Cienfuegos” como requisito para optar al título de Ingeniero Químico y autorizo que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime pertinente.

X



Firma:

Nota de aceptación

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

"La calidad no reside en las cosas que hace el hombre, sino en el hombre que hace las cosas"

Autor desconocido

Agradecimientos

Escribir estas palabras representa el resumen de 4 años de esfuerzo y experiencias inolvidables en la que estuvieron involucradas muchas personas que debo agradecerles. Primeramente a mi papá y mi mamá, mi apoyo fundamental de inicio a fin de este camino. A mis tutores Roberto y Ena por invertir tiempo y esfuerzo para poder realizar esta investigación. A todos los profesores que pusieron su empeño en dar lo mejor de sí para nuestra formación desde el primer hasta el último día que estuvimos sentados en un aula. A todas las amistades y compañeros que la universidad me permitió conocer, con los que compartí tantas fiestas y buenos momentos. Muchas gracias a todos.

Resumen:

El presente trabajo se realiza en la Universidad de Matanzas sede “Camilo Cienfuegos” en coordinación con la UEB Biopropósito España Republicana. En la investigación se propone una metodología para la optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca, para obtener alimento animal proteico. Primero se definen las técnicas analíticas para la determinación de la composición de los tallos de yuca residuales, lo que permite establecer sus principales componentes, fundamentalmente el contenido de almidón. Luego se propone, a través de un diseño de experimentos, la determinación de los parámetros óptimos del proceso de hidrólisis enzimática. Esto permite definir los valores óptimos de dosis de α -amilasa, dosis de amiloglucosidasa, tiempo de licuefacción y tiempo de sacarificación que facilitan la transformación del almidón en azúcares simples. Posteriormente, se propone el cálculo de los costos de la hidrólisis y la consiguiente optimización técnico-económica de las variables de operación, lo que garantiza la mayor transformación del almidón en azúcares simples, con el menor costo posible. La aplicación de la metodología propuesta facilitará la producción de alimento animal en Cuba, con parámetros óptimos y el menor costo posible en la etapa de hidrólisis. De esta manera se contribuye a alcanzar la soberanía alimentaria que es una tarea estratégica del país.

Abstract:

The present work is carried out at the University of Matanzas seat "Camilo Cienfuegos" in coordination with the UEB Biopropósito España Republicana. The research proposes a methodology for the technical-economic optimization of the stage of enzymatic hydrolysis of cassava stems, to obtain proteic animal feed. First, the analytical techniques for determining the composition of the residual cassava stems are defined, which allows establishing its main components, mainly the starch content. Then it is proposed, through a design of experiments, the determination of the optimal parameters of the enzymatic hydrolysis process. This allows to define the optimal values of alpha-amylase dose, amyloglucosidase dose, liquefaction time and saccharification time that facilitate the transformation of starch into simple sugars. Subsequently, the calculation of the hydrolysis costs and the consequent technical-economic optimization of the operating variables are proposed, which guarantees the greatest transformation of starch into simple sugars, with the lowest possible cost. The application of the proposed methodology will facilitate the production of animal feed in Cuba, with optimal parameters and the lowest possible cost in the hydrolysis stage. In this way, it contributes to achieving food sovereignty, which is a strategic task for the country.

Índice:

| | |
|---|----|
| Introducción:..... | 1 |
| Capítulo 1: Análisis bibliográfico | 4 |
| 1.1) Biomasa lignocelulósica | 4 |
| 1.1.1) Celulosa..... | 5 |
| 1.1.2) Hemicelulosa | 5 |
| 1.1.3) Lignina | 6 |
| 1.1.4) Clasificación de materiales lignocelulósicos | 6 |
| 1.1.5) Componentes no estructurales de los materiales lignocelulósicos..... | 6 |
| 1.2) Características de la yuca..... | 7 |
| 1.2.1) Almidón de yuca. | 8 |
| 1.1.2) Tallos de yuca..... | 11 |
| 1.3) Tecnologías de pretratamiento..... | 12 |
| 1.4) Hidrólisis..... | 13 |
| 1.4.1) Hidrólisis enzimática | 14 |
| 1.4.2) Licuefacción o dextrinización | 15 |
| 1.4.3) Sacarificación..... | 16 |
| 1.5) Factores que afectan el rendimiento de la hidrólisis | 17 |
| 1.5.1) Efecto del pH | 17 |
| 1.5.2) Efecto de la temperatura..... | 18 |
| 1.5.3) Efecto de la concentración de enzima | 19 |
| 1.6) Optimización de procesos químicos..... | 20 |
| 1.6.1) Algoritmos genéticos..... | 22 |
| 1.6.2) Tendencias actuales en el diseño de procesos | 22 |
| 1.7) Conclusiones parciales del capítulo. | 23 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 2: Materiales y métodos | 24 |
| 2.1) Esquema metodológico de la investigación..... | 24 |
| 2.2) Análisis documental..... | 24 |
| 2.3) Recolección y preparación de la materia prima..... | 24 |
| 2.4) Determinación de propiedades físico-químicas de los tallos de yuca residuales | 25 |
| 2.5) Diseño experimental de la hidrólisis enzimática | 28 |
| 2.6) Balance de masa y energía en el hidrolizador..... | 31 |
| 2.7) Diseño del hidrolizador | 33 |
| 2.8) Cálculo de costos de hidrólisis. | 36 |
| 2.9) Optimización técnico-económica. | 39 |
| 2.10) Conclusiones parciales del capítulo | 41 |
| Conclusiones:..... | 43 |
| Recomendaciones:..... | 44 |
| Referencias bibliográficas | 45 |
| Anexos: | 56 |

Introducción:

Actualmente la mayor demanda de alimentos para los animales se satisface en una alta proporción con granos y diversas fuentes de proteína (Marrero *et al.*, 2020). Sin embargo, los países en desarrollo no cuentan con suficientes recursos de producción para satisfacer dicha demanda, y han tenido que recurrir a importaciones cada vez mayores que afectan desfavorablemente sus economías. (Buitrago, 1990)

Por su versatilidad como cultivo y las extraordinarias propiedades que posee para ser utilizada en la alimentación de personas y animales, además de sus potencialidades industriales, la yuca ha sido declarada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), como el alimento del siglo XXI (Cabera, 2021).

Cuba no ha estado exento del *boom* del cultivo de la yuca, señala el doctor Sergio Rodríguez Morales, director del Instituto Nacional de Investigaciones en Viandas Tropicales (Inivit), quien está convencido de la necesidad de fomentar cada día más la siembra de ese tubérculo (Cabera, 2021).

En el procesamiento de la yuca se producen aproximadamente 96,2% de residuos sólidos, los cuales tienen un inadecuado manejo, lo que genera un impacto negativo sobre el ambiente (Marmolejo *et al.*, 2008). Entre estos sólidos se encuentran los tallos de yuca, lo cuales son generados en grandes cantidades y generalmente se les da poca aplicación en la agroindustria diferente a servir como abono y como fuente de nutrición animal (Castaño *et al.*, 2011).

Estos residuos contienen lignocelulosa y presentan una alternativa de ser usados como materia prima de bajo costo para aumentar la producción de etanol y otros compuestos a través de un pretratamiento, hidrólisis y fermentación adecuada (Castaño *et al.*, 2015; Niño *et al.*, 2013).

Con el objetivo de sustituir las importaciones de piensos para la alimentación animal la UEB España Republicana, perteneciente a LABIOFAM ha desarrollado sustratos proteicos para la alimentación animal a partir del almidón presente en materias primas convencionales (maíz, boniato, yuca) con resultados satisfactorios.

Orozco (2015) investigó el proceso de sacarificación de los tallos de yuca residuales para obtener levadura *Torula* y concluye que el resultado más favorable se obtiene mediante la hidrólisis enzimática seguida de fermentación.

Santana (2018) investigó la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca residuales y determinó que se obtiene un óptimo de máxima concentración de azúcares reductores para las condiciones de velocidad de agitación de 530 rpm (15 s^{-1}) y relación líquido-sólido de 13.

Sin embargo, se desconocen las condiciones óptimas que favorecen el proceso de hidrólisis enzimática de los tallos de yuca residuales con el menor costo de operación.

En base a los resultados de estos investigadores se plantea el siguiente **problema científico**:

¿Cómo se garantiza, económicamente, la mayor transformación del almidón presente en los tallos de yuca residuales en azúcares simples, para su posterior uso en la fermentación aerobia?

Para dar solución al problema científico se propone la siguiente **hipótesis de trabajo**:

La metodología propuesta para la optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática permitirá un mayor rendimiento de azúcares simples con el menor costo posible.

Para dar cumplimiento a la hipótesis de trabajo planteada se traza el siguiente **objetivo general** de la investigación:

Proponer una metodología para la optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática del proceso de obtención de alimento animal proteico, a partir de tallos de yuca residuales.

Para garantizar su cumplimiento se trazan los siguientes objetivos específicos:

1. Definir las técnicas analíticas para la determinación de la composición de los tallos de yuca residuales.

2. Proponer a través de un diseño de experimentos, la determinación de los parámetros de operación óptimos de la etapa de hidrólisis enzimática de los tallos de yuca residuales.
3. Proponer el cálculo de los costos de la etapa de hidrólisis.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En este capítulo se presenta la fundamentación teórica necesaria para realizar la investigación. Para darle cumplimiento se consultan revistas, tesis de grado, de maestría y de doctorado mediante una búsqueda bibliográfica en bases de datos disponibles en internet como *Scielo*, *Science direct* y *ELSEVIER*.

1.1) Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica representa una fuente de azúcares de gran disponibilidad. Muchos de los materiales con alto contenido lignocelulósico son residuos de diferentes actividades económicas del hombre, en particular los residuos agrícolas. Su utilización en la producción de diferentes productos representa el aprovechamiento de material vegetal no destinado a la producción de alimento (Cando *et al.*, 2018; Sanchez, 2008).

Consta principalmente de 3 componentes, celulosa, hemicelulosa y lignina que forman una matriz sólida que en función de las proporciones de cada polímero le confiere al material propiedades de dureza y flexibilidad (Bernad, 2021; Bridgewater, 1999; Valverde *et al.*, 2020).

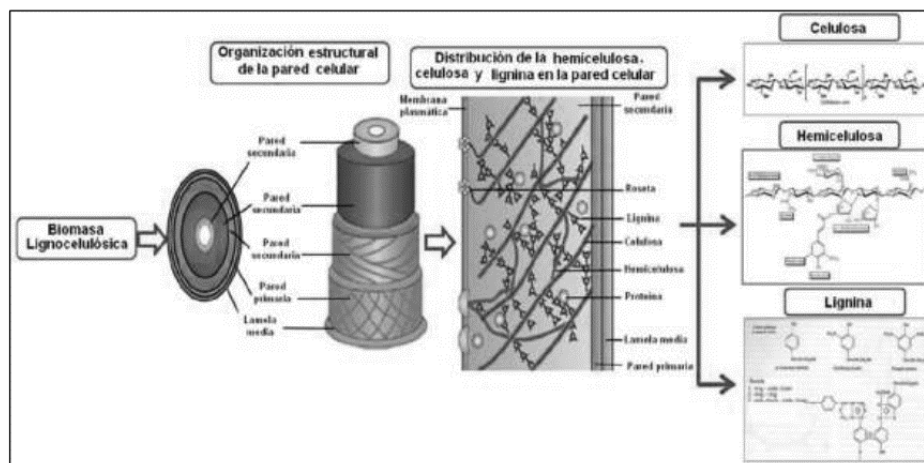


Figura 1.1: Estructura de la biomasa lignocelulósica.

Fuente: Pérez *et al.* (2005).

1.1.1) Celulosa

La celulosa es una cadena de azúcares unidos mediante enlace glucosídico β (1,4) D-glucopiranososa. La celulosa conforma tanto estructuras cristalinas como amorfas. Las fibras de celulosa son en mayoría independientes y se unen mediante enlaces de hidrógeno (Holguín y Elizabeth, 2021; Pérez *et al.*, 2005).

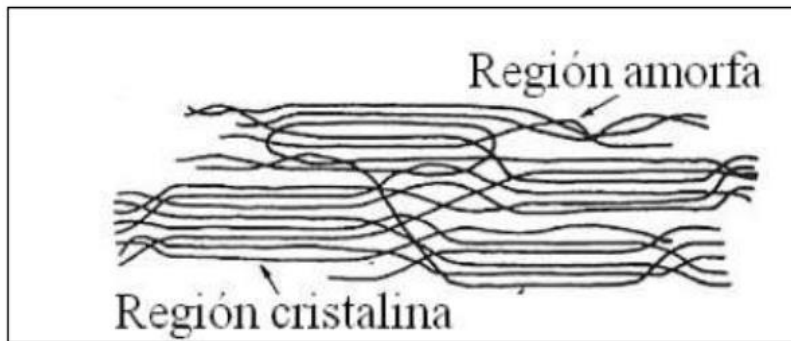


Figura 1.2: Fibrilla elemental de la celulosa.

Fuente: Barroso (2010).

1.1.2) Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polisacárido complejo que existe en asociación con la celulosa en las paredes vegetales. Es una mezcla de azúcares como la glucosa, manosa, xilosa, arabinosa y ácidos como como el metil glucorónico y galacturónico. El principal componente de la hemicelulosa de maderas duras y plantas agrícolas como pastos y paja es el xilano, mientras que para maderas blandas es el glucomanano (Herrera *et al.*, 2020; Sánchez y Cardona, 2007).

La solubilidad de los diferentes compuestos de la hemicelulosa en orden descendente es manosa, xilosa, glucosa, arabinosa y galactosa. La solubilidad incrementa con el aumento de la temperatura (Castillo *et al.*, 2021; Gray *et al.*, 2003). La solubilización en agua de los compuestos de la hemicelulosa inicia aproximadamente en 180°C bajo condiciones neutras (Bobleter, 1994). Otras variables como el pH y la humedad influyen en este proceso (Balaban y Ucar, 1999), de esta manera el ambiente ácido o alcalino permite extraer xilano, sin embargo el glucomanano difícilmente puede extraerse en medio ácido y necesita ambientes alcalinos fuertes (Cardona y Orrego, 2009).

1.1.3) Lignina

Es un polímero aromático mononuclear altamente ramificado y sustituido que se encuentra adyacente a las fibras de celulosa, abundante en especies madereras. Este consta de un heteropolímero de tres unidades de fenilpropano (p-cumaril, coniferil y sinail) cuya función principal es de dar soporte estructural a la planta, impermeabilidad y resistencia contra el ataque microbiano y otros agentes oxidantes (Cardona y Orrego, 2009; Villanueva *et al.*, 2020). La lignina no es soluble en agua y es óptimamente inactiva, lo que hace difícil su degradación que ocurre alrededor de 180 °C bajo condiciones neutrales (Bobleter, 1994). La solubilidad depende del precursor (p-cumaril, coniferil y sinail) en ambiente ácido, neutro o alcalino (Grabber, 2005).

1.1.4) Clasificación de materiales lignocelulósicos

Según el origen de los materiales lignocelulósicos más importantes en la producción de etanol se clasifican en seis grupos (Sánchez y Cardona, 2007):

- Residuos agrícolas (materiales derivados del cultivo, pajas y tallos).
- Residuos agroindustriales (bagazo de caña, rastrojo de maíz y pulpa de aceituna).
- Maderas (duras como aserrín, virutas, ramas y las blandas como las coníferas).
- Biomasa herbácea (pastos, heno y alpiste).
- Desechos celulósicos (residuos del procesamiento del papel).
- Residuos sólidos urbanos (papel, cartón, cáscaras de frutas y verduras).

En la biomasa lignocelulósica la celulosa es generalmente la fracción mayoritaria alrededor de 40–50% en peso y la hemicelulosa alrededor de 20–40% (Cardona y Orrego, 2009; Flores y Quiñones, 2018). Por ejemplo, el bagazo de caña de azúcar contiene 40–50% de celulosa, 20-30% de hemicelulosa, 20–25% de lignina y 1,5–3,0 % de cenizas (Cardona y Orrego, 2009).

1.1.5) Componentes no estructurales de los materiales lignocelulósicos

Estos componentes no hacen parte de la estructura de la pared celular. Hay dos tipos, los solubles en agua y en solventes orgánicos y los insolubles, que son los materiales inorgánicos (Barroso, 2010).

Solubles en agua y disolventes orgánicos:

- Terpenos: Se consideran polímeros de isopreno y están relacionados con los alcoholes terpénicos y algunas cetonas.
- Resinas: Son las grasas, ácidos grasos, alcoholes, fitoesteroides.
- Fenoles: Como los taninos derivados de ácido gálico y de la catequina.
- Proteínas: De presencia intrínseca a la naturaleza de materiales vivos.
- Otros: Hidratos de carbono de bajo peso molecular, alcaloides y lignina soluble.

Insolubles:

- Cenizas: Son compuestos inorgánicos, principalmente sales minerales, como carbonatos y oxalatos.

1.2) Características de la yuca.

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) es un arbusto perenne originario de Suramérica y difundido en muchos países de zonas tropicales y subtropicales de América, Asia y África, incluidas muchas islas del Pacífico. (Corozo *et al.*, 2020; García *et al.*, 2014).

La yuca es uno de los componentes principales de producción agrícola en América Latina y el Caribe (Cabera, 2021). Este cultivo ha sido utilizado en todo el mundo especialmente en las áreas rurales donde se cultiva por su alta producción de calorías, su adaptación a la sequía, resistencia a los insectos y consumo animal (Gunz *et al.*, 1985). Su estructura está compuesta por los tubérculos y la parte aérea (tallos y hojas) como se observa en la Figura 1.3.

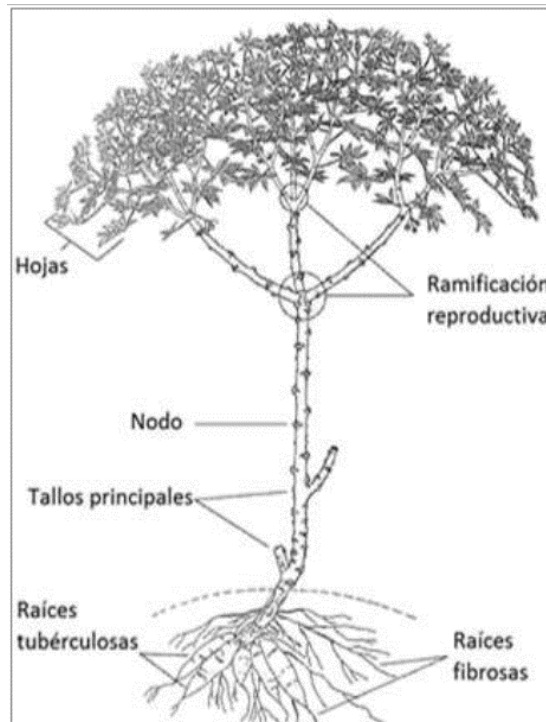


Figura 1.3: Estructura del cultivo de yuca.

Fuente: Kollie (2014).

Por su versatilidad como cultivo y las extraordinarias propiedades que posee para ser utilizada en la alimentación de personas y animales, además de sus potencialidades industriales, la yuca ha sido declarada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), como el alimento del siglo XXI (Cabera, 2021).

Cuba no ha estado exento del *boom* del cultivo de la yuca, señala el doctor Sergio Rodríguez Morales, director del Instituto Nacional de Investigaciones en Viandas Tropicales (Inivit), quien está convencido de la necesidad de fomentar cada día más la siembra de ese tubérculo (Cabera, 2021).

1.2.1) Almidón de yuca.

El almidón es quizás el polímero natural más importante que existe y es la mayor fuente de energía obtenida de varias plantas (Martelo-Guzmán *et al.*, 2020). Se encuentra en las semillas de cereales (maíz, trigo, arroz, sorgo), en tubérculos (papa), en raíces (yuca, batata, arrurruz), en semillas de leguminosas (frijoles, lentejas, guisantes), frutas (bananas y manzanas y tomates verdes), troncos (palma sago) y hojas (tabaco) (Aristizábal *et al.*, 2007).

El alto contenido de almidón de la yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón, hace de este un importante cultivo industrial además de ser un cultivo alimenticio rico en calorías (Meneses *et al.*, 2017). El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, por delante de la papa y el trigo; se usa principalmente sin modificar, es decir como almidón nativo, pero también es usado modificado con diferentes tratamientos para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación, dispersión y de esta manera poder usarlo en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares (Aristizábal *et al.*, 2007).

El almidón está constituido por unidades de glucosa dispuestas en dos componentes: amilosa y amilopectina; su proporción varía de un tipo a otro según sea su fuente (Anexo 1). Estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación (Urbina *et al.*, 2021). El contenido de amilosa y el grado de polimerización -número total de residuos anhidroglucosa presentes dividido por el número de terminales reducidos- son importantes en la determinación de las propiedades físicas, químicas y funcionales del almidón. Por ejemplo, el tamaño de los gránulos del almidón muestra relación con la proporción amilosa/amilopectina (Delpeuch y Favier, 1980).

Amilosa

Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4), el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones pero generalmente se encuentra entre 1 000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral. En un extremo de la macromolécula la unidad de glucosa contiene el hidroxilo del carbono anomérico (a) libre, por lo cual se llama extremo reductor (Aspinal, 1983; Ospina-Gómez y Ligarreto-Moreno, 2019). En el extremo opuesto, o no reductor, el hidroxilo del carbono anomérico forma parte del enlace glucosídico (Figura 1.4). La abundancia de hidroxilos otorga propiedades hidrofílicas al polímero, impartándole afinidad por el agua. Sin embargo, debido a su linearidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma

paralela mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes para reducir así su afinidad por el agua (Aristizábal *et al.*, 2007).

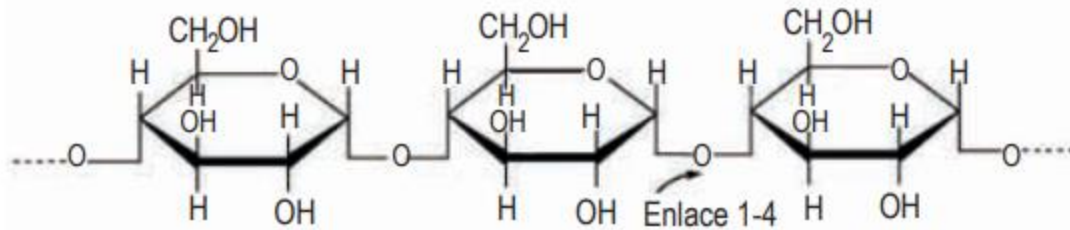


Figura 1.4: Esquema de la amilosa.

Fuente: Aristizábal *et al.* (2007).

Amilopectina

Es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces α -D-(1 \rightarrow 4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces α -D-(1 \rightarrow 6) que forman los puntos de ramificación (Figura 1.5). La amilopectina tiene 5-6% de enlaces α -D-(1 \rightarrow 6) y está constituida de alrededor de 100 000 moléculas de glucosa (Duprat *et al.*, 1980; Salgado-Ordosgoitia *et al.*, 2019)

El gran tamaño y naturaleza ramificada de la amilopectina reduce la movilidad de los polímeros e interfiere su tendencia a orientarse muy estrechamente para permitir niveles significantes de enlaces de hidrógeno. Como resultado, los soles o soluciones acuosas de amilopectina se caracterizan por su claridad y estabilidad como medida de la resistencia a gelificarse durante el almacenamiento. Los soles de amilopectina no forman películas tan fuertes y flexibles como la amilosa y no forman un complejo con yodo asociado con su coloración azul profunda (Aristizábal *et al.*, 2007).

La amilopectina en sus estructuras lineales puede formar también complejos; pero como estas partes lineales son cortas, las hélices que se forman son cortas y solo se pueden introducir moléculas pequeñas dentro de ellas (Vargas-Vázquez *et al.*, 2020). La amilopectina puede formar complejos de color rosa con el yodo y no puede formar complejos con los ácidos grasos (Aristizábal *et al.*, 2007).

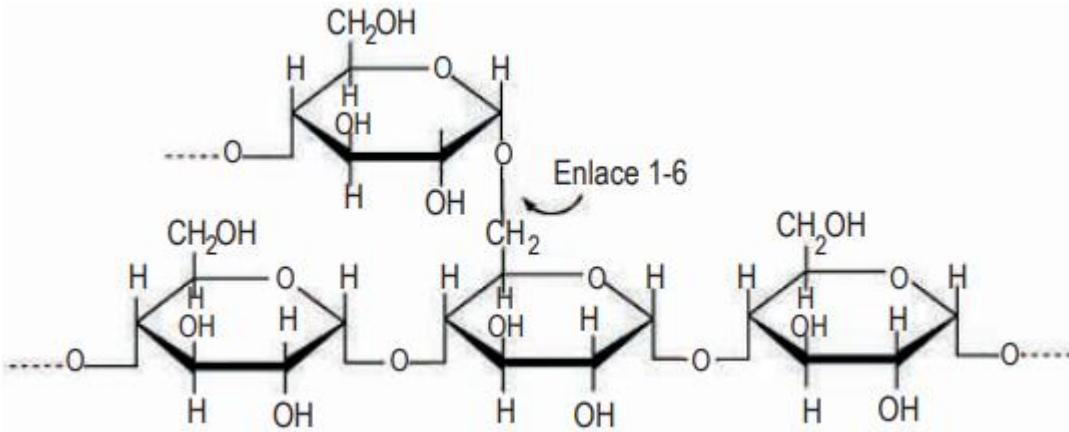


Figura 1.5: Esquema de la amilopectina.

Fuente: Aristizábal *et al.* (2007).

1.1.2) Tallos de yuca.

En el procesamiento de la yuca se producen aproximadamente 96,2% de residuos sólidos, los cuales tienen un inadecuado manejo causante de un impacto negativo sobre el ambiente (Marmolejo *et al.*, 2008). Entre estos sólidos se encuentran los tallos de yuca, los cuales son generados en grandes cantidades y tienen poca aplicación en la agroindustria diferente a servir como abono y como fuente de nutrición animal (Castaño *et al.*, 2011).

La caracterización química de los tallos de yuca, reveló que estos están constituidos en un 46% por carbohidratos, de los cuales los más importantes son los glucanos (33%) y xilanos (12%) (Orozco, 2015).

Estos residuos contienen lignocelulosa y presentan una alternativa de ser usados como materia prima de bajo costo para aumentar la producción de etanol y otros compuestos a través de un pretratamiento, hidrólisis y fermentación adecuada (Castaño *et al.*, 2015; Niño *et al.*, 2013).

1.3) Tecnologías de pretratamiento.

La conversión de biomasa lignocelulósica es un proceso complejo debido a la estructura química de la pared celular de este material vegetal, por lo tanto, es necesario implementar un tratamiento previo el cual permita pasar de un complejo celulósico a azúcares fermentables que contengan principalmente glucosa (Castillo *et al.*, 2019; Han *et al.*, 2017). En la Figura 1.6 se ilustra el objetivo del pretratamiento sobre la biomasa lignocelulósica que es la exposición de la celulosa para romper la lignina y hemicelulosa que la cubren (Mosier *et al.*, 2005). Como proceso de pretratamiento se han explorado diferentes métodos como la hidrólisis ácida concentrada (Liao *et al.*, 2006), ácida diluida (Cara *et al.*, 2008), tratamiento alcalino (Carrillo *et al.*, 2005), tratamiento con solventes orgánicos (Xu *et al.*, 2006) entre otros.

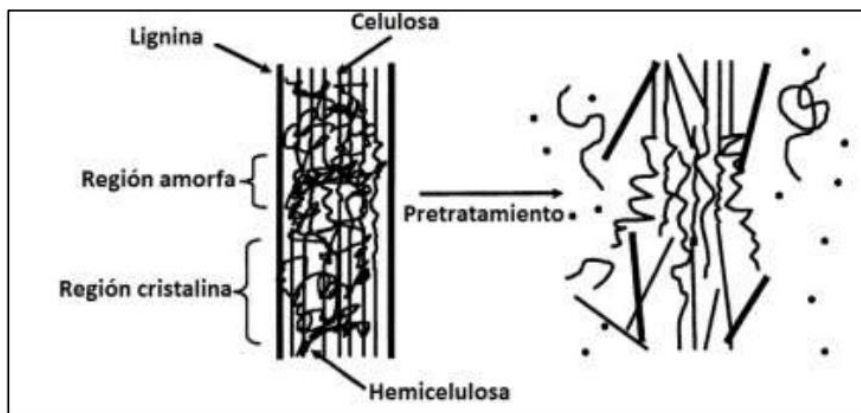


Figura 1.6: Efecto del pretratamiento sobre la biomasa lignocelulósica.

Fuente: Mosier *et al.* (2005).

Existen tres diferentes tipos de pretratamientos:

Físicos

Los pretratamientos físicos corresponden a la reducción de tamaño de las partículas de la biomasa para incrementar así el área superficial para el ataque enzimático y reducir la cristalinidad de la celulosa (Rincón y Silva, 2017; Sun y Cheng, 2002). Este es el primer paso para la producción de etanol a partir de residuos, e involucra procesos como la

molienda, astillado, trituración o calentamiento (Rincón y Silva, 2017; Sun y Cheng, 2002; Xu *et al.*, 2006). Estos métodos mejoran la eficiencia de los siguientes procesos.

Químicos

Los pretratamientos químicos utilizan ácidos, bases o agentes oxidantes para la separación de los compuestos de la biomasa (Rincón y Silva, 2017).

La técnica de pretratamiento alcalino es un proceso de deslignificación, en el cual una buena cantidad de hemicelulosa es solubilizada. El mecanismo de hidrólisis alcalina es la saponificación de enlaces éster intramoleculares entre la lignina y la hemicelulosa (Lee, 1997). Por lo tanto, comúnmente para superar la barrera de la lignina, la lignocelulosa es inicialmente pretratada con el método alcalino (Lee, 1997). Una eficiente deslignificación deberá remover un máximo de lignina y un mínimo de azúcares (no más que 5%). Dentro de los compuestos utilizados para el pretratamiento alcalino tenemos al CaO y NaOH (Rincón y Silva, 2017).

Biológicos

Este tipo de pretratamientos introducen la acción de microorganismos para la descomposición de la biomasa (Rincón y Silva, 2017). Entre los microorganismos utilizados, para la degradación del complejo lignocelulósico y liberar celulosa, están los hongos de putrefacción café, blanca y suave (Sarkar, 2018). El hongo de putrefacción blanca resulta ser el más efectivo para la degradación de lignina (Prasad *et al.*, 2017).

1.4) Hidrólisis

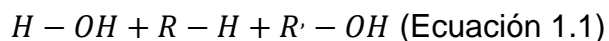
La hidrólisis es una reacción química entre una molécula de agua y otra macromolécula, en la cual la molécula se divide y sus átomos pasan a formar unión de otra especie química. Esta reacción es importante por el gran número de contextos en los que el agua actúa como disolvente (Mesa *et al.*, 2021; Sanchez, 2020).

En química orgánica, la hidrólisis se presenta como la reacción opuesta a la condensación. En este contexto la molécula orgánica y el agua reaccionan y rompen un enlace covalente para formar dos moléculas orgánicas con grupos funcionales que

incluyen los átomos de la molécula de agua. En general se requiere añadir ácidos o bases fuertes para catalizar la hidrólisis (Sanchez, 2020).

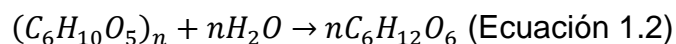
1.4.1) Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática se produce mediante un grupo de enzimas llamadas hidrolasas. Estas enzimas ejercen un efecto catalítico hidrolizante, producen la ruptura de enlaces de agua según:



En algunos casos este grupo puede ser transferido por la enzima a otras moléculas y se considera la hidrólisis misma como una transferencia del grupo al agua (Noriega, 2016). La hidrólisis enzimática es nombrada mediante el sustrato seguido de la palabra hidrolasa, cuando la enzima es específica para separar un grupo en particular, éste puede utilizarse como prefijo. A veces suele utilizarse el nombre común de la enzima, por lo que muchas veces el sufijo asa, nos indicará generalmente que se trata de una hidrolasa. Por ahora no ha sido posible encontrar una nomenclatura sistemática para todas las péptido-hidrolasas, por lo que hoy en día, para las nuevas enzimas, su nombre se forma según fuente de péptido hidrolasa seguido, si es necesario, de una letra para distinguirla de otra enzima (Peña, 2004).

La diferencia entre la celulosa y el almidón radica en que en el almidón, los restos de glucosa están unidos entre sí por uniones glucosídicas 1-4, con orientación α , mientras que la celulosa tiene uniones 1-4 glucosídicas con orientación β . Además de esto se sabe que el almidón contiene alrededor del 20 % de una fracción soluble en agua llamado amilosa y el 80% de una solución insoluble conocida como amilopectina (Santillán *et al.*, 2021). La Ecuación 1.2 muestra el proceso de hidrólisis para la glucosa.



La hidrólisis del almidón sucede en varias etapas; primero se obtiene las dextrinas (polisacáridos de menor masa molecular), luego maltosa y por último la glucosa. Esta hidrólisis se puede demostrar de dos maneras diferentes según Bolaños (2003), la desaparición del color azul característico de la prueba del yodo-yoduro y la aparición de

D-glucosa, un azúcar reductor, el cual puede ser detectado con los reactivos de Benedict, Fehling.

En estudios encontrados sobre los residuos de la cocina que se centraron primordialmente en la fracción de almidón y especialmente en el método de pretratamiento (Kumar *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2011) demuestran que los gránulos de almidón se hinchan y se rompen para que las moléculas de amilosa (comprendida entre 250 y 6000 unidades de glucosa) y amilopectina (polisacárido con estructura altamente ramificada con grado de polimerización de 10 a 60 unidades de glucosa por rama) se desplieguen y se dispersen en solución con agua caliente. En estas condiciones, las enzimas atacan las moléculas de almidón y funcionan mejor en el proceso llamado licuefacción y sacarificación.

1.4.2) Licuefacción o dextrinización

En el paso de licuefacción se requiere la gelatinización para aumentar la tasa de la hidrólisis, al degradar lentamente el almidón nativo por la amilasa (Santillán *et al.*, 2021; Urbina *et al.*, 2021). Por lo tanto, la gelatinización juega un papel importante durante el proceso de licuefacción al suavizar los gránulos de almidón hasta formar una especie de masa viscosa y contribuir al ataque enzimático para facilitar que el almidón se divida por la enzima (De Lira, 2018; Febles, 2020). La gelatinización se logra al calentar el almidón con agua. En esta condición, los poros del almidón se hacen más grandes de lo habitual y la enzima puede fácilmente penetrar en el polímero de almidón e interrumpir el enlace de hidrógeno para debilitar las cadenas de polímeros (Santillán *et al.*, 2021).

El proceso de licuefacción se emplea para aflojar la estructura del polímero de almidón, reducir la viscosidad del almidón gelatinizado y facilitar la hidrólisis con α -amilasa, que es una enzima termoestable que se emplea para producir polisacáridos de longitud intermedia (maltodextrinas de 5 a 10 unidades de glucosa) (Febles, 2020; Liao *et al.*, 2006) que atacará los enlaces interiores de gránulos de almidón compuestos de largas cadenas de residuos de glucosilo unidos por un enlace (1,4) glucosídico. La ramificación está compuesta por fracciones de amilopectina unidas por enlaces glucosídicos (1,6). La α -amilasa se emplea debido a sus acciones activas, degrada las largas cadenas de almidón para que el almidón no forme un gel a una temperatura más baja y producirá

más extremos de la cadena (Vedia *et al.*, 2019). Por licuefacción, las moléculas de almidón ramificadas y no ramificadas de la amilopectina se convierten para generar glucosa. La α -amilasa es una enzima endoactiva que hidroliza los enlaces α - (1-4) de forma aleatoria, que produce los malto oligosacáridos (lineales o ramificados). La unidad de glucosa que se produce cuando los enlaces alfa que unen n unidades de $C_6H_{10}O_5$ en el polímero de almidón se escinden es $C_6H_{12}O_6$ (Osorio *et al.*, 2019).

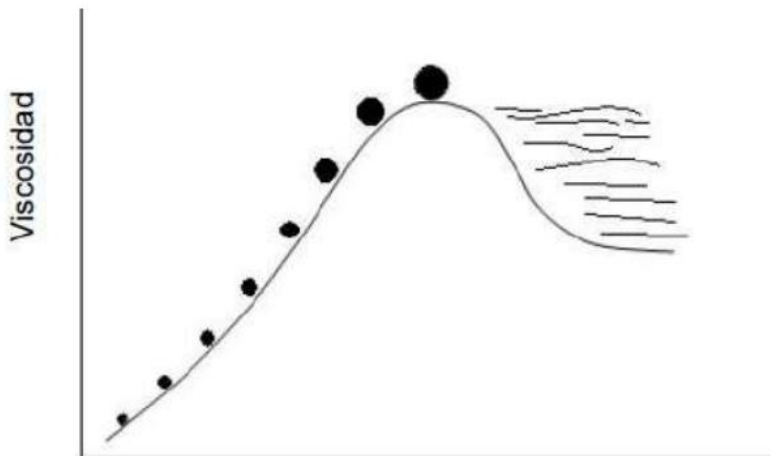


Figura 1.7: Proceso de gelatinización del almidón.

Fuente: (Santillán *et al.*, 2021).

1.4.3) Sacarificación

Se utiliza la enzima glucoamilasa en esta etapa, que escindiré las moléculas de glucosa solo de los extremos no reductores de las cadenas. La glucoamilasa rompe los enlaces glucosídicos-(1,6) en el almidón licuado con aproximadamente un 96% de rendimiento de glucosa y aproximadamente 4% de subproducto. El tratamiento es exitoso si se elimina la hemicelulosa en gran medida, lo que deja la fracción de celulosa más accesible a las enzimas (Arismendy *et al.*, 2019; Castillo *et al.*, 2019; K. Olofsson, 2008).

La glucoamilasa es una enzima exo-actuante que separa moléculas de β -maltosa del extremo no reductor de la amilosa o de las ramas externas de la amilopectina. Entonces la amilosa se degrada en oligosacáridos y maltosas para generar moléculas de glucosa (Orozco, 2015).

1.5) Factores que afectan el rendimiento de la hidrólisis

Tanto los pasos de licuefacción como de sacarificación tienen diferentes niveles y valores óptimos de temperatura y pH para la velocidad de reacción máxima y el rendimiento del producto. Según Santillán *et al.* (2021), el producto de glucosa aumenta ligeramente con el aumento del valor de pH, lo mismo ocurre con la temperatura donde hay un ligero incremento de la cantidad de glucosa al aumentar la temperatura. El rendimiento de hidrólisis también depende de la concentración de sustrato, tipo de almidón, dosis de enzima, tiempo necesario y velocidad de agitación, tamaño de gránulo y viscosidad del almidón crudo (Febles, 2020; Orozco, 2015; Urbina *et al.*, 2021).

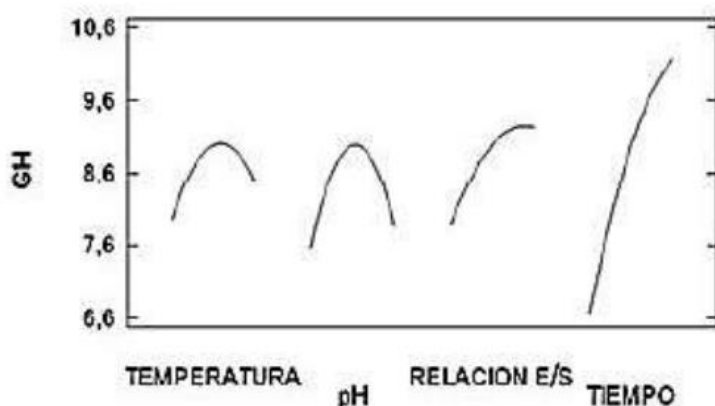


Figura 1.8: Efectos principales para la hidrólisis enzimática.

Fuente: Santillán *et al.* (2021).

1.5.1) Efecto del pH

Las actividades de las enzimas dependerán de las concentraciones de iones hidronio del medio, esto afectará el nivel de ionización de aminoácidos de la proteína, en dependencia del sitio activo del sustrato (si es ionizable), o del complejo enzima-sustrato; el pH influirá en la estructura tridimensional de la proteína y a su vez, la relación que tenga la enzima por el sustrato (Zapata *et al.*, 2019).

En su mayoría las enzimas presentan un rango de pH generalmente estrecho presentado así una actividad óptima y se desactivará para pH máximos. Al aplicar en alimentos se debe considerar que el pH de un gran porcentaje de los alimentos tiene una variación

entre 3,0 y 7,0; sólo las frutas y sus derivados tienen un pH más ácido que llega a ser de 2,2. Por evidentes razones, se tienen que seleccionar enzimas que funcionen eficientemente al pH del alimento, debido a que esto será difícilmente modificable (González-Avila *et al.*, 2021; Morales *et al.*, 2017; Zapata *et al.*, 2019).

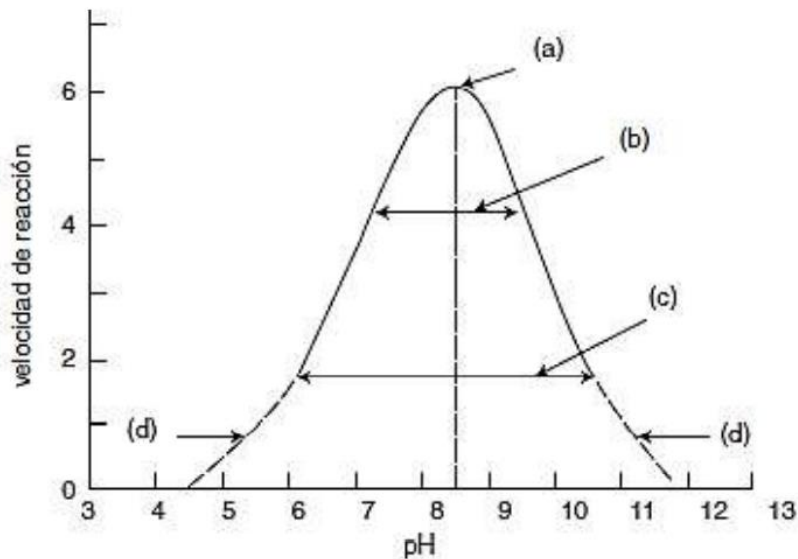


Figura 1.9: Efecto del pH en la actividad enzimática: (a),pH óptimo;(b), intervalo de estabilidad de la enzima;(c),intervalo de inactivación reversible y (d),inactivación irreversible.

Fuente: Dergal (2006).

1.5.2) Efecto de la temperatura

Cada enzima cuenta con una temperatura óptima de hidrólisis. Por debajo y por encima de esta temperatura, la enzima ralentiza la velocidad de la reacción enzimática, como sucede con cualquier reacción química al incrementarse la temperatura, aumentar la energía cinética de las moléculas y existen más moléculas de sustrato con suficiente energía para reaccionar, pero sólo en el intervalo en que la enzima es estable y retiene su capacidad catalítica; en casos extremos, cuando el incremento es demasiado alto se favorece la desnaturalización (la mayoría de las proteínas globulares se desnaturalizan por encima de 60 - 70°C) y consecuentemente la proteína pierde su capacidad catalítica. Por ello cada enzima tiene un intervalo óptimo de temperatura en el cual se logra la mayor actividad, en su mayoría está entre 30 y 55°C, y se inactiva a más de 60°C, a esta

temperatura la energía introducida en el sistema, sobrepasa la energía de las fuerzas que mantienen la estructura activa de la enzima (Dergal, 2006; González-Avila *et al.*, 2021).

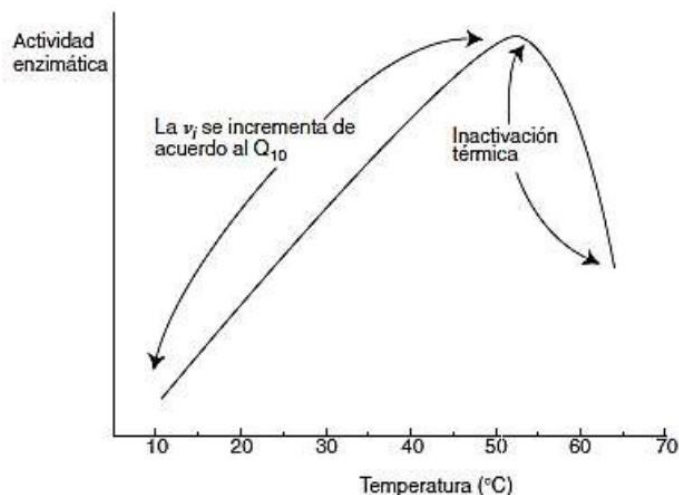


Figura 1.10: Efecto de la temperatura en la actividad catalítica de las enzimas.

Fuente: Dergal (2006).

1.5.3) Efecto de la concentración de enzima

Una enzima funciona de manera más eficaz si la concentración del sustrato es superior en relación con la concentración de enzima (Quelal *et al.*, 2019). Esto es a causa de que las colisiones con el reactivo serán más continuas al fijar que un gran porcentaje de enzima se encuentre activa. A estas condiciones, el producto se obtendrá a la máxima velocidad posible por cada cantidad de enzima presente. En caso de que la concentración de sustrato sea menor, la velocidad de reacción disminuye generalmente de acuerdo con un comportamiento como el que se muestra en la Figura 1.11. La acción de una enzima debe ser óptima tanto en términos de costo como de eficiencia catalítica, por lo que la reacción se debe llevar a cabo en la medida de lo posible a la máxima velocidad (Batallas Merino *et al.*, 2018; Dergal, 2006).

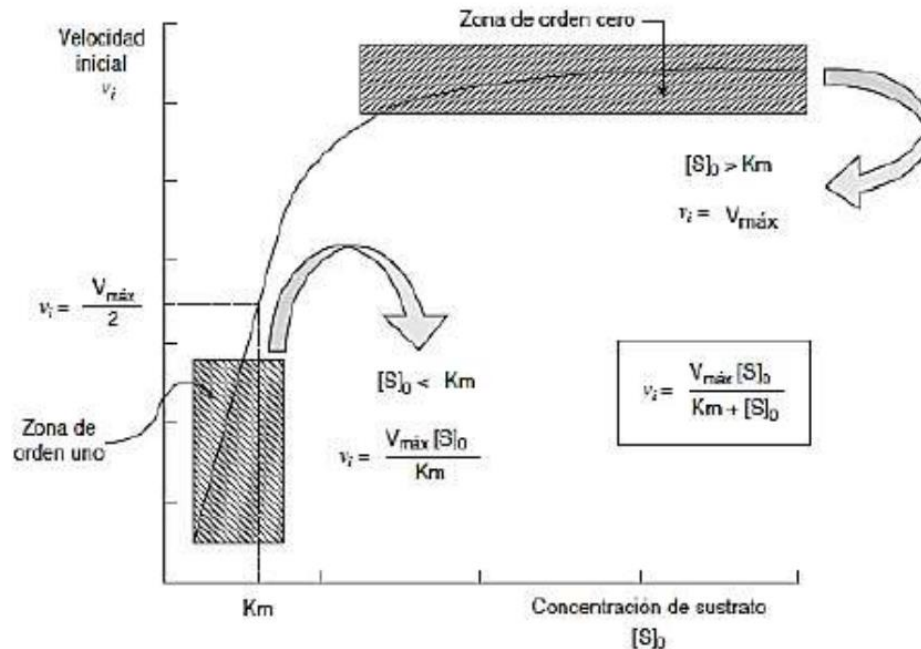


Figura 1.11: Efecto de la concentración del hidrolizado en la velocidad de reacción de las enzimas.

Fuente: Dergal (2006).

1.6) Optimización de procesos químicos.

Aumentar la presión para reducir costes, mejorar la calidad del producto y minimizar riesgos medio ambientales son algunas de las motivaciones para desarrollar herramientas de optimización para los complejos problemas de operación y diseño de una planta química. Varios factores han contribuido a este desarrollo. En primer lugar la disponibilidad de ordenadores y su creciente capacidad de cálculo ha facilitado la aplicación de complejos modelos matemáticos (Franco *et al.*, 2020). En segundo lugar, el desarrollo y mejoría de los modelos económicos que permiten decidir entre diferentes procesos competitivos. Y en tercer lugar el reciente desarrollo del software para optimización que ha proporcionado la herramienta adecuada para el uso de los modelos matemáticos tanto de operaciones físicas como económicas, para la identificación de las mejores soluciones. De hecho, muchas de las decisiones en la industria química relacionadas con diseño de procesos y operaciones están basadas en técnicas de

optimización que combinan los nuevos desarrollos en algoritmos de optimización, modelado de sistemas, y arquitectura y software de ordenadores (Caballero, 2020).

Aunque muchas de las técnicas matemáticas fueron desarrolladas por investigadores relacionados con investigación de operaciones, análisis numérico y ciencia de los ordenadores, los ingenieros químicos han jugado un importante papel en alguno de estos desarrollos (de hecho un importante porcentaje de las personas implicadas en investigación de operaciones son ingenieros químicos) (Caballero, 2020).

Si no se asume ninguna estructura especial para el problema a tratar entonces las técnicas de búsqueda directa son los métodos más sencillos de aplicar, pero son también los que más tiempo consumen. Estos métodos realizan una búsqueda pseudo aleatoria o sistemática (simplex flexible, algoritmos genéticos, optimización por enjambres de partículas, etc.) para mejorar la función objetivo. Si el problema presenta restricciones estos métodos usan métodos costosos y a menudo con dificultades intrínsecas, por ejemplo los métodos de penalización. Como contrapartida el método es fácil de aplicar a problemas con restricciones sencillas y probablemente encontrará soluciones cercanas al óptimo global. Sin embargo debido al hecho de que a menudo requiere miles de evaluaciones de la función objetivo su rendimiento será altamente dependiente de la selección de los parámetros del algoritmo (Caballero, 2020; Castrillón-Marín y Rubio-Clemente, 2020).

La aproximación más frecuente para resolver problemas de optimización consiste en clasificarlos de acuerdo al tipo de función objetivo y al tipo de restricciones y desarrollar métodos específicos que aprovechen la estructura especial de dichos problemas (Caballero, 2020).

El caso más conocido, es el de la programación lineal (LP). En este caso la función objetivo es lineal y las restricciones que forman el problema también son lineales. La solución óptima de un LP cae en un vértice del espacio formado por la región factible. Cualquier solución local debe ser además la solución global del problema. Estos problemas han sido resueltos durante muchos años utilizando el algoritmo *Simplex*, basado en métodos algebraicos. El cambio principal en los métodos de solución de los problemas de programación lineal ha sido el desarrollo de problemas de punto interior,

que tratan con transformaciones no lineales y cuyos requerimientos de cálculo están teóricamente acotados por un polinomio expresado en términos del tamaño del problema. Esta propiedad no la comparte el algoritmo del *Simplex*, que teóricamente tiene un crecimiento exponencial, aunque este comportamiento es rara vez observable en la práctica. El algoritmo *Simplex* permite resolver problemas de manera eficiente, que contengan hasta 10 000 ó 15 000 restricciones (Caballero, 2020; Rodríguez y Granda, 2005).

1.6.1) Algoritmos genéticos

Según Cano *et al.* (2018) los algoritmos genéticos son metaheurísticas de búsqueda global, que se basan en un algoritmo poblacional que en cada iteración evalúa varias soluciones de forma simultánea, lo cual genera mayor eficiencia a la hora de encontrar una solución cercana al óptimo. De esta forma, los algoritmos genéticos pretenden optimizar una función objetivo, medida de desempeño o valor *fitness* de una población de elementos denominados cromosomas (conjunto de soluciones), a través del cruce y mutación de sus genes (Salazar *et al.*, 2019).

Con base en una dinámica evolutiva, un algoritmo genético propaga las mejores características a partir de las mejores soluciones, y desaparece las soluciones que presentan características no deseables, alejadas de la función objetivo. Por lo tanto, al emplear un operador de cruce se transmite y combina información importante de buenas soluciones a una próxima generación; y al emplear el operador de mutación se ingresa un componente de aleatoriedad o regla probabilística que explora diferentes soluciones, que por medio del cruce se podrían obviar. Incluso, los algoritmos genéticos permiten adoptar estrategias de elitismo para preservar las mejores soluciones y utilizarlas para generar soluciones que puedan contener carga genética de alta calidad (García *et al.*, 2020; Pérez, 2021).

1.6.2) Tendencias actuales en el diseño de procesos

Según Rodríguez y Granda (2005) y Aduvire (2019) las tendencias actuales en el diseño de procesos pasan por:

- Reducción de los costes de las materias primas.
- Reducción de la inversión de capital.

- Reducción del consumo energético.
- Incremento de la flexibilidad del proceso y reducción del almacenamiento de productos.
- Mayor énfasis en seguridad.
- Mayor atención a la calidad.
- Mejor comportamiento medioambiental.

Para la consecución de todos estos objetivos la simulación de procesos juega un papel muy importante (Durán-García y Ruiz-Navas, 2020; Rodríguez y Granda, 2005):

- Reduce el tiempo de diseño de la planta y permite al diseñador comprobar varias configuraciones de planta
- Ayuda a optimizar el proceso y permite responder a preguntas del tipo “y si”, así como determinar las condiciones de proceso óptimas para unas restricciones dadas.
- Predice los costes de planta y la viabilidad económica

1.7) Conclusiones parciales del capítulo.

1. Los tallos de yuca presentan una alternativa de usarse como materia prima, de bajo costo, para producir alimento animal.
2. Los principales factores que afectan la hidrólisis enzimática y que inciden en los costos son la concentración y calidad del sustrato, los pretratamientos aplicados, temperatura, tiempo de hidrólisis y velocidad de agitación.
3. Las técnicas de optimización contribuyen a mejorar la eficiencia de los procesos al permitir la minimización de los costos.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo se describe la metodología a seguir en la investigación, así como los procedimientos y técnicas analíticas a utilizar. El trabajo experimental se realiza en los laboratorios del departamento de Química de la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad de Matanzas, sede “Camilo Cienfuegos” en coordinación con la Unidad Empresarial de Base (UEB) Biopropósito España Republicana de LABIOFAM.

2.1) Esquema metodológico de la investigación

Se plantea el siguiente esquema metodológico para el desarrollo de la investigación:

1. Análisis documental.
2. Recolección y preparación de la materia prima.
3. Determinación de propiedades físico-químicas de los tallos de yuca residuales
4. Diseño experimental de la hidrólisis enzimática del almidón contenido en el material para obtener azúcares simples.
5. Balances de masa y energía en el hidrolizador.
6. Diseño del hidrolizador.
7. Cálculo de costos de hidrólisis.
8. Optimización técnico-económica.

2.2) Análisis documental

Se consulta el reporte de las siembras de yuca en la provincia de Matanzas durante la campaña 2020-2021 otorgado por el Ministerio de la Agricultura Provincial donde se reflejan las variedades de yuca más cosechadas por municipio.

2.3) Recolección y preparación de la materia prima

Los tallos de yuca residuales de la variedad CMC-40 se recolectan en la UBPC “Ceiba Mocha”. Los tallos frescos se cortan en trozos de 10 cm de longitud y pasan a secar al sol y al aire durante 2 semanas. A continuación se trituran en un molino artesanal del tipo martillo hasta un tamaño de partícula de aproximadamente 2 mm y se somete a un secado adicional a 60 °C en una estufa (DHG-9146A, China) durante 24 horas. El material seco se tamiza en un juego de tamices donde se obtienen partículas de 0,5 y 1

mm que se utilizan en la determinación de la composición química de la materia y el análisis de la etapa de hidrólisis respectivamente. Las fracciones se conservan según su tamaño de partícula en bolsas de polietileno a temperatura ambiente.

2.4) Determinación de propiedades físico-químicas de los tallos de yuca residuales

Caracterización física.

Se determina la densidad de los tallos de yuca. Para ello se toman 11 trozos de tallos frescos sin previo secado, se pesan en balanza técnica de sensibilidad de 0,01 g y se determina el volumen por inmersión en una probeta de 1L. Los resultados se procesan estadísticamente en el software *Statgraphics Plus* versión 5.0.

Es necesario determinar cuántas veces la variedad es capaz de absorber su peso en agua. Se toman 10 g de tallo triturado y tamizado de tamaños de partícula de 1 mm y 0,5 mm para añadirles agua destilada hasta que se cubra todo el material. Este procedimiento se realiza el fin para ajustar los rangos de la relación líquido-sólido del diseño de experimentos.

Caracterización química.

Se determina el almidón, humedad, cenizas (componentes minerales), sustancias extractivas, carbohidratos estructurales (celulosa y hemicelulosa) a partir de los procedimientos analíticos reflejados en los protocolos del *National Renewable Energy Laboratory* de los EE.UU. (Sluiter *et al.*, 2008).

Almidón:

La técnica es una modificación de la referida por Sluiter *et al.* (2008). Primero se hidroliza enzimáticamente la muestra de tallos para lograr la transformación del almidón en azúcares reductores. Se sustituye es el empleo de la cromatografía por la determinación de azúcares reductores totales (ART), la cual se realiza como se explica posteriormente.

Humedad:

El material se seca a 105 °C en una estufa (DHG-9146A, China) durante 24 h, y el contenido de humedad se determina gravimétricamente mediante el empleo de una balanza analítica digital (Sartorius BS 124S, China).

Cenizas:

Se determina tras incinerar de una muestra del material a 550°C en horno mufla analógica con control térmico (SX2 Series, China).

Extractivos en etanol:

Se colocan 5 gramos de la materia prima en un aparato Soxhlet de 75 mL para realizar una extracción con 160 mL de etanol al 95% por 24 horas mediante un baño María. Al concluir la extracción, el dedal con los sólidos residuales se lava con etanol para secar al aire por 2 días y luego en estufa a 40 °C por 24 h. El etanol se separa del extracto por rotoevaporación (IKA RV 05 Basic, Alemania). El balón con el extracto seca a 40 °C por 24 h y se cuantifica gravimétricamente.

Polisacáridos fácilmente hidrolizables (PFH):

La determinación de los polisacáridos fácilmente hidrolizables ofrece una medida del contenido de hemicelulosa presente en el material. Se basa en el método de análisis gravimétrico por solubilización de las hemicelulosas.

En un balón esmerilado de 100 mL se mezclan 2 g de muestras libres de extractivos con 20 mL de ácido clorhídrico al 5 % en masa. La mezcla se agita cuidadosamente durante 30 minutos. Se refluja durante 3 h en baño María. La mezcla se deja enfriar hasta temperatura ambiente y se filtra a vacío. Los residuos sólidos de la filtración se secan a 105°C durante 24 h, se enfrían y pesan. Se determina el contenido de polisacáridos fácilmente hidrolizables mediante la ecuación 2.1.

$$PFH = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100 \text{ (Ecuación 2.1)}$$

Donde:

- m_i : Masa inicial de la muestra (g).
- m_f : Masa del residuo (g).

El contenido de PFH también se determina a partir de los azúcares reductores totales en el filtrado.

Polisacáridos difícilmente hidrolizables (PDH):

La determinación de los polisacáridos difícilmente hidrolizables indica la cantidad de celulosa presente en el material. Se basa en el método de análisis gravimétrico por solubilización de la celulosa.

Se pesa el residuo obtenido en la determinación de polisacáridos fácilmente hidrolizables y se colocan en un vaso de precipitado de 100 mL. Se mezcla con 15 mL de ácido sulfúrico al 72% en masa y se agita periódicamente durante 2 h a temperatura ambiente. Posteriormente, la mezcla se transfiere a un balón de 500 mL, se le adiciona 135 mL de agua destilada y se coloca en reflujo durante 2 h en un baño de agua. Finalmente, la mezcla se enfría y se filtra a vacío. El residuo de la filtración se seca a 105°C durante 24 horas, se enfría y pesa. El contenido de PDH se calcula mediante la ecuación 2.2:

$$PDH = \frac{(m_{ir} - m_{fr})}{m_1} * 100 \text{ (Ecuación 2.2)}$$

Donde:

- m_i : Masa inicial de la muestra (g).
- m_{ir} : Masa inicial del residuo de la determinación de PFH (g).
- m_{fr} : Masa final del residuo de este proceso (g).

Lignina:

Se determina mediante la cuantificación gravimétrica del residuo obtenido en la determinación de PDH. Se calcula mediante la ecuación 2.3.

$$\% \text{ Lignina} = \frac{m_3}{m_0} * 100 \text{ (Ecuación 2.3)}$$

Donde:

- m_0 : Masa inicial de la muestra (g).
- m_3 : Masa final del residuo de la determinación de PDH (g).

2.5) Diseño experimental de la hidrólisis enzimática

Con este procedimiento se determina la convertibilidad enzimática del almidón contenido en el material para su transformación en azúcares simples.

Se fijan las siguientes variables para la experimentación:

- Temperaturas óptimas para la α -amilasa y la amiloglicosidasa (85°C y 60°C, respectivamente).
- pH óptimos para la α -amilasa y la amiloglicosidasa (5.8 y 4.5, respectivamente).
- Tamaño de partícula (entre 0.5 mm y 1 mm) (Zhu *et al.*, 2015).

Se confecciona un diseño de experimento de compuesto central elaborado por el software *Statgraphics Plus* versión 5.0. Se incluye la aleatoriedad de los experimentos, de forma tal que se pueda garantizar su repetibilidad. Se realizan 3 réplicas. Se seleccionan como factores para evaluar su influencia:

Dosis de amiloglicosidasa: El rango a evaluar es de 0,5 - 2 g/kg de almidón a hidrolizar. Estos valores se seleccionan en función de los datos reportados por el fabricante de la enzima.

Dosis de α -amilasa: El rango en este caso es también de 0,5 - 2 g/kg de almidón a hidrolizar. Estos valores son seleccionados a partir de las especificaciones del fabricante de la enzima.

Tiempo de licuefacción: Se selecciona entre 0,5 - 2,5 h a partir de datos de la literatura relacionados con la enzima.

Tiempo de sacarificación: El rango seleccionado es de 24 – 48 h, que coincide con el tiempo reportado en la literatura.

La combinación de las variables para la realización de cada uno de los experimentos se muestra en la tabla 2.1.

Se escoge como **variable de respuesta** a la **concentración de azúcares reductores totales (ART)**, la cual ofrece una medida del grado de completamiento de la hidrólisis enzimática. Además se determina el rendimiento de sólidos y el equivalente de dextrosa (EDE).

Tabla 2.1: Condiciones del diseño experimental.

| Corrida | Dosis α -amilasa | Dosis Amiloglucosidasa | Tiempo de Licuefacción | Tiempo de Sacarificación | |
|---------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| 1 | 0,5 | 0,5 | 2,5 | 48 | |
| 2 | 0,5 | 2 | 0,5 | 48 | |
| 3 | 1,25 | 1,25 | 1,5 | 12 | |
| 4 | 1,25 | 2,75 | 1,5 | 36 | |
| 5 | 2 | 0,5 | 2,5 | 48 | |
| 6 | 1,25 | 1,25 | 0,5 | 36 | |
| 7 | 1,25 | 1,25 | 1,5 | 36 | |
| 8 | 2 | 2 | 2,5 | 48 | |
| 9 | 0,5 | 2 | 2,5 | 48 | |
| 10 | 0,5 | 0,5 | 2,5 | 24 | |
| 11 | 0,25 | 1,25 | 1,5 | 36 | |
| 12 | 1,25 | 0,25 | 1,5 | 36 | |
| 13 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 24 | |
| 14 | 1,25 | 1,25 | 1,5 | 60 | |
| 15 | 0,5 | 2 | 0,5 | 24 | |
| 16 | 0,5 | 2 | 2,5 | 24 | |
| 17 | 1,25 | 1,25 | 1,5 | 36 | |
| 18 | 2 | 2 | 0,5 | 48 | |
| 19 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 48 | |
| 20 | 1,25 | 1,25 | 3,5 | 36 | |
| 21 | 2 | 0,5 | 0,5 | 48 | |
| 22 | 2,75 | 1,25 | 1,5 | 36 | |
| 23 | 2 | 0,5 | 2,5 | 24 | |
| 24 | 2 | 2 | 2,5 | 24 | |
| 25 | 2 | 2 | 0,5 | 24 | |
| 26 | 2 | 0,5 | 0,5 | 24 | |

Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar la conversión del almidón nativo procedente de los tallos de yuca residuales se siguió la metodología planteada por Martín *et al.* (2017):

- Mezclar los tallos pesados previamente con la cantidad de agua destilada según el diseño.
- Ajustar el pH a 5,8.
- Encubar por 15 minutos a 85 °C.
- Añadir la enzima termoestable α -amilasa.
- Mantener 2 h con esta enzima.
- Refrescar la mezcla hasta 60 °C.
- Ajustar el pH a 4,5.
- Transcurrido 15 minutos añadir la amiloglucosidasa y mantener 24 horas.
- Filtrar.
- El líquido se conserva en frío para determinar el contenido ART.
- El sólido se seca, se pesa para determinar el rendimiento de sólidos.

Para determinar la cantidad de azúcares reductores obtenidos se toman muestras del líquido extraído del hidrolizado y se lee en un espectrofotómetro.

Azúcares reductores totales:

Se determina colorimétricamente por el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNSA) como desarrollador de color con absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro. Los valores se ajustan por mínimos cuadrados y se determina la ecuación mejor ajustada a los valores experimentales mediante la cual se calculan las concentraciones de las muestras.

Rendimiento de sólidos:

Para determinar el rendimiento de cada experimento se calcula con la ecuación 2.4:

$$\% \text{Rendimiento} = 100 * \frac{m_{final}}{m_{inicial}} \text{ (Ecuación 2.4)}$$

Donde:

- m_{final} : Masa final después de la hidrólisis (g).
- m_{inicial} : Masa inicial (g).

Para ello, se pesa el sólido resultante de cada experimento, previamente secado, como el material lignocelulósico inicial seco.

Equivalente de dextrosa:

Se calcula mediante la ecuación 2.5:

$$EDE(\%) = \frac{\text{masa de azúcares reductores}}{\text{masa de almidón}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

2.6) Balance de masa y energía en el hidrolizador.

Balances de masa

Para conocer el volumen que ocupa toda la mezcla a hidrolizar se hace necesario establecer la relación sólido-líquido (RLS) con que ocurre la hidrólisis enzimática mediante la adición de la α -amilasa y amiloglucosidasa. Se fija RLS= 15.

De aquí que:

$$F_{\text{agua}} = RLS \cdot F_{\text{tallos}} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

- F_{agua} : Flujo de agua cruda para hidrolizar (kg/día).
- F_{tallos} : Flujo de tallos de yuca a hidrolizar (kg/día).
- RLS: Relación sólido-líquido.

La masa de almidón se determina por la ecuación 2.7.

$$m_{\text{almidón}} = m_s \cdot \%_{\text{almidón}} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

- $m_{\text{almidón}}$: masa de almidón (kg/h).
- $\%_{\text{almidón}}$: porcentaje de almidón.

Según Herrera y Pons (2014) la transformación de almidón a glucosa es de 1,11 por lo que la masa de glucosa se calcula por la ecuación 2.8.

$$m_{glucosa} = m_{almidón} \cdot 1,11 \text{ (Ecuación 2.8)}$$

Donde:

- $m_{glucosa}$: masa de glucosa (kg/h).
- $m_{almidón}$: Masa de almidón (kg/h).

Cálculo de dosificación de enzimas

En la etapa de hidrólisis se añaden dos enzimas, en primer lugar la α -amilasa y posteriormente la amiloglicosidasa. Se establece la cantidad de enzima a emplear en la relación de 0.8 mg de enzima/kg almidón a hidrolizar y se determina por la ecuación 2.9.

$$m_{enzima} = 0,8 \cdot m_{almidón} \text{ (Ecuación 2.9)}$$

Donde:

- m_{enzima} : masa de enzima a agregar al hidrolizador (g).

Balances de energía

Durante la hidrólisis es necesario garantizar la temperatura para que ocurra adecuadamente la actividad de las enzimas. Se calcula el flujo de vapor necesario en el hidrolizador para mantener estables dichas condiciones mediante la ecuación 2.10.

$$m_s \cdot cp_s \cdot T_s + m_v \cdot h_v = m_s \cdot cp_s \cdot T_F + m_v \cdot h_L \text{ (Ecuación 2.10)}$$

Donde:

- m_s : Flujo de la suspensión (kg/h).
- cp_s : Capacidad calórica de la suspensión (kJ/kg °C).
- T_s : Temperatura de la suspensión (°C).
- m_v : Flujo de vapor (kg/h).
- h_v : Entalpía del vapor (kJ/kg).
- h_L : Entalpía del líquido (kJ/kg).
- m_f : Flujo a la salida del equipo (kg/h).

- T_F : Temperatura final (°C).

Para calcular el flujo de la suspensión se emplea la ecuación 2.11.

$$m_s = F_{tallos} + F_{agua} \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

- F_{tallos} : Flujo de tallos (kg/h).
- F_{agua} : Flujo de agua (kg/h).

Para calcular la capacidad calorífica de la suspensión se emplea la ecuación 2.12.

$$cp_i = 4,18 \cdot (1 - X_i) \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Donde:

- Cp_i : capacidad calorífica de cualquier suspensión (kJ/kg °C).
- X_i : fracción de sólidos en la suspensión.

La fracción de sólidos en la suspensión se calcula por la ecuación 2.13.

$$X_S = \frac{m_s}{F_{tallos} + F_{agua}} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Los valores de entalpía se extraen del libro de Keenan *et al.* (1988), de las tablas 1 para la temperatura de la suspensión y tabla 2 para la presión de vapor.

2.7) Diseño del hidrolizador

Tras precisar el valor del flujo de agua para que ocurra la hidrólisis se determina el volumen que ocupa. Para ello se utiliza el valor de densidad calculado previamente. Con este volumen y el volumen que ocupan los tallos se calcula el volumen de la suspensión a hidrolizar, para ello se usan las ecuaciones 2.14 y 2.15.

$$V_{agua} = \frac{F_{agua}}{\rho_{agua}} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Donde:

- V_{agua} : volumen de agua cruda para hidrolizar (m³).

- ρ_{agua} : densidad del agua cruda para hidrolizar (kg/m^3).

$$V_s = V_{\text{tallos}} + V_{\text{agua}} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Donde:

- V_s : volumen de la suspensión en el hidrolizador, ($\text{m}^3/\text{día}$).

Para el diseño del equipo se utiliza la heurística 9.6 de Turton *et al.* (1998), el volumen de la suspensión en el hidrolizador y el número de hidrolizadores que se fija.

Diámetro y la altura de los tanques.

Se calculan mediante la ecuación 2.16.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Donde:

- V : volumen del tanque (m^3).
- D : diámetro del tanque (m).
- h : altura del tanque (m).

Material de construcción de los tanques.

El material de construcción debe ser resistente a la corrosión ya que durante el proceso se utilizan microorganismos y barato para disminuir los costos de inversión.

Un elemento fundamental en el proceso es el agitador ya que la velocidad de agitación es un parámetro del diseño. Se emplea la metodología de Rosabal y Valle (2006), en la cual se siguen los siguientes pasos para la adecuada selección.

Selección del agitador.

Para la correcta selección del agitador se necesitan las propiedades físicas de la suspensión. Se tiene en cuenta el consumo de electricidad y su eficiencia.

Dimensiones del agitador.

Las dimensiones del agitador se calculan mediante los datos que brinda la tabla 21 del apéndice (Rosabal y Valle, 2006).

Donde:

- d/D : relación diámetro del agitador – diámetro del tanque.

- Z: número de hélices.
- A: ángulo de inclinación.

Potencia del agitador.

La potencia que consume el agitador se calcula por la ecuación 2.17.

$$N = K_N \cdot \rho_s \cdot n^3 \cdot d^5 \text{ (Ecuación 2.17)}$$

Donde:

- N: potencia de agitación (W).
- K_N : número de potencia.
- ρ_s : densidad de la suspensión (kg/m^3).
- n: velocidad de rotación del rodete (s^{-1}).

Como el tanque se diseña con un criterio de altura del líquido diferente al diámetro ($H \neq D$) se utiliza la Figura 9.7 (Rosabal y Valle, 2006) para calcular el valor de K_N . El resultado se multiplica por el término $(H/D)^{0.5}$.

Para hacer uso de este gráfico es necesario calcular el Reynolds modificado, presente en la ecuación 2.18.

$$Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho_s}{\mu_s} \text{ (Ecuación 2.18)}$$

Donde:

- Re_m : Reynolds modificado.
- μ_s : viscosidad de la suspensión.

Para realizar los cálculos correspondientes a la potencia es necesario conocer las propiedades físicas de la suspensión, las cuales se determinan mediante las ecuaciones 2.19 a 2.23.

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{x}{\rho_p} + \frac{1-x}{\rho_l} \text{ (Ecuación 2.19)}$$

$$x = \frac{m_p}{m_s} \text{ (Ecuación 2.20)}$$

$$\varphi = \frac{x \cdot \rho_l}{(\rho_p - (\rho_p - \rho_l) \cdot x)} \text{ (Ecuación 2.21)}$$

$$\mu_s = \mu_l \cdot (1 + 2,5 \cdot \varphi) \text{ (Para } \varphi \leq 0,1 \text{) (Ecuación 2.22)}$$

$$\mu_s = \mu_l \cdot \frac{0,59}{(0,77-\varphi)^2} \quad (\text{Para } \varphi \leq 0,3) \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

Donde:

- ρ_p : Densidad del sólido (kg/m^3).
- ρ_l : Densidad del líquido (kg/m^3).
- X: Fracción másica de sólido.
- m_p : Masa de sólido (kg).
- m_s : Masa de la suspensión (kg).
- Φ : Fracción de volumen del sólido en la suspensión.
- μ_l : Viscosidad del líquido ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$).

2.8) Cálculo de costos de hidrólisis.

Para la estimación del costo de inversión se utiliza el *software Capcost 2008* según el índice de costos *Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)* para junio de 2021 con un valor de 701,4.

Para determinar las ganancias en esta etapa del proceso se utiliza la ecuación 2.24.

$$G = Vp - Cp \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Donde:

- G: Ganancia (\$/a).
- Vp: Valor de la producción (\$/a).
- Cp: Costo de producción (\$/a).

El valor de la producción se determina mediante la ecuación 2.25.

$$Vp = pup \cdot N \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Donde:

- Vp: valor de la producción (\$/a).
- Pup: precio unitario del producto (\$/kg).
- N: volumen de producción (kg/a).

Según LABIOFAM (2021) el precio unitario del producto es de 2,587 \$/kg.

El costo de producción se determina por la sumatoria del costo de las materias primas, utilidades y amortización.

Las materias primas en la etapa son los tallos de yuca y las enzimas, su costo se determina por la ecuación 2.26.

$$C_{mp} = C_{tallos} + C_{enzimas} \text{ (Ecuación 2.26)}$$

Donde:

- C_{mp} : costo de materias primas (\$).
- C_{tallos} : costo de los tallos de yuca (\$).
- $C_{enzimas}$: costo de las enzimas (\$).

Para calcular el costo de los tallos y las enzimas se emplea la ecuación 2.27.

$$C_{mat} = C_{u.mat} \cdot F_{mat} \text{ (Ecuación 2.27)}$$

Donde:

- C_{mat} : Costo del material a emplear (tallos, enzima) (\$).
- $C_{u.mat}$: Costo unitario del material a emplear (\$·h/kg).
- F_{mat} : Cantidad de material a utilizar (kg/h).

El precio unitario de los tallos es de 0,01 \$/kg según Iglesias (2016) y para las enzimas es de 23,5 \$/kg para α -amilasa y 23,73 \$/kg para amiloglucosidasa, según LABIOFAM (2021).

Las utilidades empleadas en el proceso se encuentran: agua, vapor y electricidad. Para determinar los costos de las mismas se emplean las ecuaciones siguientes.

Para calcular los costos del agua se emplea la ecuación 2.28.

$$C_{agua} = C_{u.agua} \cdot F_{agua} \text{ (Ecuación 2.28)}$$

Donde:

- C_{agua} : Costo del agua (\$).

- $C_{u.agua}$: costo unitario del agua (\$·h/kg).
- F_{agua} : Flujo de agua a utilizar (kg/h).

El costo unitario del agua es de 0,01\$/kg según LABIOFAM (2021).

Para calcular los costos de electricidad se emplea la ecuación 2.29.

$$C_{elec} = C_{u.elec} \cdot N \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

Donde:

- C_{elect} : costo de la electricidad (\$).
- $C_{u.elect}$: costo unitario de la electricidad (\$/kW·h).
- N : potencia del agitador (kW).

Para calcular los costos de vapor se emplea la ecuación 2.30.

$$C_{vapor} = C_{u.vapor} \cdot F_{vapor} \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

Donde:

- C_{vapor} : Costo del vapor (\$).
- $C_{u.vapor}$: Costo unitario del vapor (\$/t).
- F_{vapor} : Flujo de vapor (t).

El costo unitario del vapor es de 6,3 \$/t según LABIOFAM (2021).

Para determinar la amortización se fija un tiempo de vida útil del equipo de 10 años, de este modo se calcula mediante la ecuación 2.31.

$$A = \frac{I}{td} \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

Donde:

- A : Amortización (\$/a).
- I : Inversión calculada (\$).
- td : Tiempo de vida útil del equipo (a).

2.9) Optimización técnico-económica.

Es necesario realizar la optimización técnico-económica de las variables de operación del proceso, debido a que el óptimo obtenido como resultado del diseño de experimentos no necesariamente conduce al menor valor del costo de operación. Las variables de decisión son la dosis de α -amilasa, dosis de amiloglucosidasa, tiempo de licuefacción y tiempo de sacarificación. Se define como función objetivo a minimizar la suma de los costos de operación del proceso en función de las variables de decisión, como se aprecia en la ecuación 2.32.

$$C_{op} = C_{AA} + C_{AM} + C_{TLIC} + C_{TSAC} \text{ (Ecuación 2.32)}$$

Donde:

- C_{op} : Costo de operación (\$).
- C_{AA} : Costo debido a la α -amilasa (\$).
- C_{AM} : Costo debido a la amiloglucosidasa (\$).
- C_{TLIC} : Costo del tiempo de licuefacción (\$).
- C_{TSAC} : Costo del tiempo de sacarificación (\$).

Cada uno de estos costos se calculan como se especifica a continuación:

Costos para tiempo de sacarificación.

$$C_{TSAC} = (C_{VSAC} + C_{Ag}) * t_{SAC} \text{ (Ecuación 2.33)}$$

Donde:

- C_{TSAC} : Costos para tiempo de sacarificación (\$).
- C_{VSAC} : Costo de vapor de sacarificación (\$/h).
- C_{Ag} : Costo de agitación (\$/h).
- T_{SAC} : Tiempo de sacarificación (h).

$$C_{VSAC} = C_{u.vapor} * W_{VSAC} \text{ (Ecuación 2.34)}$$

Donde:

- $C_{u.vapor}$: Costo unitario de vapor (\$/kg).

- W_{VSAC} : Flujo de vapor de sacarificación (kg/h).

El costo de agitación se calcula mediante la ecuación 2.35:

$$C_{Ag} = C_E * N \text{ (Ecuación 2.35)}$$

Donde:

- C_E = Costo unitario de electricidad (\$/kW·h).
- N = Potencia del agitador (kW).

Costos para tiempo de licuefacción.

$$C_{TLIC} = (C_{VLIC} + C_{Ag}) * t_{LIC} \text{ (Ecuación 2.36)}$$

Donde:

- C_{TLIC} : Costos para tiempo de licuefacción (\$).
- C_{VLIC} : Costo de vapor de licuefacción (\$/h).
- C_{Ag} : Costo de agitación (\$/h).
- T_{lic} : Tiempo de licuefacción (h).

$$C_{VLIC} = C_{u.vapor} * W_{Vlic} \text{ (Ecuación 2.37)}$$

Donde:

- $C_{u.vapor}$: Costo unitario de vapor (\$/kg).
- W_{VLIC} : Flujo de vapor de licuefacción (kg/h).

El costo de agitación es igual al caso anterior.

Costos para α -amilasa.

$$C_{AA} = D_{AA} * m_{almidón} * C_{u.AA} \text{ (Ecuación 2.38)}$$

Donde:

- C_{AA} = Costos para α -amilasa (\$).
- D_{AA} = Dosis de α -amilasa (g_{enzima}/kg_{almidón}).
- $m_{almidón}$ = Masa de almidón (kg).
- $C_{u.AA}$ = Costo unitario de α -amilasa (\$/g_{enzima}).

Costos para amiloglucosidasa.

$$C_{AM} = D_{AM} * m_{almidón} * C_{u.AM} \text{ (Ecuación 2.39)}$$

Donde:

- C_{AM} = Costos para amiloglucosidasa (\$).
- D_{AM} = Dosis de amiloglucosidasa (g_{enzima}/kg_{almidón}).
- $m_{almidón}$ = Masa de almidón (kg).
- $C_{u.AM}$ = Costo unitario de amiloglucosidasa (\$/g_{enzima}).

Se definen como restricciones del problema las condiciones de no negatividad, lo que indica que todas las variables de decisión tienen que ser positivas. Además se incluye como restricción que el equivalente de dextrosa debe ser superior al 90 %, lo que se expresa con la ecuación de regresión obtenida como resultado del diseño de experimentos. Esta ecuación tiene la forma general que se observa en la fórmula 2.40.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad \text{(Ecuación 2.40)}$$

Donde β y ϵ representan diferentes coeficientes de regresión, \mathbf{x} representa a las variables de decisión y por último la \mathbf{y} es la variable de respuesta que en este caso es el equivalente de dextrosa. Esta es una ecuación no lineal. Pero puede linealizarse si se sustituyen las variables x_i^2 y $x_i \cdot x_j$ por otras. De esta manera la ecuación se transforma en una ecuación lineal, lo que permite transformar el problema de optimización en uno de programación lineal, ya que todas sus ecuaciones serían lineales. Para su solución se aplica el método *Simplex*.

2.10) Conclusiones parciales del capítulo

Se propone como estrategia a seguir para la optimización técnico-económica de la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca para obtener alimento animal proteico, la siguiente:

- Determinación de la composición de los tallos de yuca residuales.
- Determinación de los parámetros de operación óptimos de la etapa de hidrólisis enzimática de tallos de yuca residuales, mediante un diseño de experimentos.

- Cálculo de los costos de la etapa de hidrólisis.
- Optimización técnico-económica de los parámetros de operación de la etapa que garanticen el mayor rendimiento de azúcares simples con el menor costo posible.

Conclusiones:

1. Se definen las técnicas para la determinación de la composición de los tallos de yuca residuales, lo que permite establecer los componentes principales que lo forman, fundamentalmente el contenido de almidón, que constituye el compuesto esencial para obtener alimento animal proteico.
2. El diseño de experimentos central compuesto determina los valores óptimos de dosis de α -amilasa, dosis de amiloglucosidasa, tiempo de licuefacción y tiempo de sacarificación que facilitan la transformación del almidón en azúcares simples.
3. El cálculo de los costos de la etapa de hidrólisis y la consiguiente optimización técnico-económica permiten garantizar la mayor transformación del almidón en azúcares simples, con el menor costo posible.

Recomendaciones:

- Aplicar la metodología propuesta en la presente investigación para comprobar los resultados esperados.

Referencias bibliográficas

- Aduvire, O. (2019). Innovaciones técnicas en el tratamiento de aguas acidas de mina con recuperación de subproductos con valor económico *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4, 55-64.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000100006&nrm=iso
- Arismendy, A. M., Villa Retrepo, A. F., Alcaraz, W., Chamorro, E. R., y Area, M. C. J. R. d. C. y. T. (2019). Optimización de la hidrólisis enzimática de la cascarilla de arroz. (32), 1-10.
- Aristizábal, J., Sánchez, T., y Lorío, D. M. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Aspinal, G. O. (1983). The Polysaccharides. Vol. 3. *New York, Estados Unidos de América Academic Press*.
- Axayacatl, O. (2018). Estadísticas agrícolas. México.
- Balaban, M., y Ucar, G. (1999). The effect of the duration of alkali treatment on the solubility of polyoses. *Turk J. Agric. Forest.*, Vol 23, 192-202.
- Barroso, M. (2010). Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. *Universidad politécnica de Madrid, Madrid*.
- Batallas Merino, F., Salvador Pinos, C. A., Villavicencio Montoya, J., González Gavilánez, H., y González Suárez, E. (2018). Hydrolysis of sugarcane bagasse to obtain ethanol using native and commercial enzymes *Centro Azúcar*, 45, 90-100.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612018000400009&nrm=iso
- Bernad, E. O. (2021). *Desoxigenación de biomasa lignocelulósica y oleaginosa mediante catalizadores basados en nanomateriales de carbono* Universidad de Zaragoza].

- Bobleter, O. (1994). Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. . *Prog. Poly.Sci., Vol. 19*, 179 – 841.
- Bolaños. (2003). Química de alimentos: Manual de laboratorio. . *San Jose Costa Rica: Universidad Costa Rica*.
- Bridgewater, A. (1999). Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal anal Appl Pyrolysis, vol 51*, 3-22.
- Buitrago, J. A. (1990). *La yuca en la alimentación animal*. Centro internacional de agricultutura animal.
- Caballero, J. A. (2020). Optimización de procesos químicos. *RUA*. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19734/1/Introducci%C3%B3n.pdf>
- Cabera, F. P. (2021). ¿Por qué la yuca es el alimento del siglo XXI? *Granma*. <https://www.granma.cu/ciencia/2021-03-05/por-que-la-yuca-es-el-alimento-del-siglo-xxi-05-03-2021-22-03-40>
- Cando, S., Fernández, R., y Cando, K. J. U. C. y. T. (2018). Los biocombustibles: análisis de los cultivos energéticos y la biomasa lignocelulosica. *Universidad Ciencia y Tecnología, 1*(3).
- Cano, J. A., Correa-Espinal, A. A., y Gómez-Montoya, R. A. (2018). Solución del Problema de Conformación de Lotes en Almacenes utilizando Algoritmos Genéticos *Información tecnológica, 29*, 235-244. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000600235&nrm=iso
- Cara, C., Ruiz, E., Ballesteros, M., Manzanares, P., Negro, M., y Castro, E. (2008). Production of fuel ethanol from steam-explosion pretreated olive tree pruning. *Fuel, 87*, 692-700.
- Cardona, C., y Orrego, C. (2009). Avances investigativos en la producción de combustibles. *Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.*, 172-175.

- Carrillo, F., Lis, M., Colom, X., Valldeperas, M., y Valldeperas, J. (2005). Effect of alkali pretreatment on cellulase hydrolysis of wheat Straw: Kinetic study. . *Proc Biochem.*, Vol 40, 3360 – 3364.
- Castaño, H., Reales A., J. G., y Zapata M., J. (2015). Enzymatic hydrolysis of cassava stalks pretreated with the alkaline method *Agronomía Colombiana*, 33, 238-243. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652015000200014&nrm=iso
- Castaño, H. I., Reales, J., y Zapata, J. (2011). Sacarificación y fermentación simultánea de tallos de yuca. *Dyna*, 180, 97-104.
- Castillo, S. C. H. R., Pacheco, Z. N. C., Baños, S. B., Aguilar, R. I. V., Bermudez, B. S. S., Gudiño, P. O., y Cervantes, A. B. (2021). Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para obtención de compuestos poliméricos biobasados. *Agrociencia*, 55(5), 403-416.
- Castillo, Y., Juscamaita Morales, J., Jorge Montalvo, P. A., y Visitación Figueroa, L. (2019). Pretratamiento e hidrólisis enzimática de la cascarilla de arroz *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85, 476-488. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000400476&nrm=iso
- Castrillón-Marín, M., y Rubio-Clemente, A. (2020). Optimización del proceso sono-foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales usando un diseño central compuesto *Producción + Limpia*, 15, 24-45. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000200024&nrm=iso
- Corozo, L., Héctor, E., Macias, F., Vásquez, B., Pinargote, B., Cobeña, G., Mendoza, A., y Arteaga, F. (2020). MICROPROPAGACIÓN DE DOS VARIETADES ECUATORIANAS DE YUCA (*Manihot esculenta* CRANTZ). *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 36, 224-232. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-38902020000300507&nrm=iso

- De Lira, M. (2018). Producción de etanol a partir de residuos lignocelulósicos: optimización de la hidrólisis enzimática y efecto de la aplicación de vacío en la fermentación.
- Delpeuch, E., y Favier, J. C. (1980). Caractéristique des amidons de plantes alimentaires tropicales: action de l'alpha-amylase, gonflement et solubilité. . *Paris, Ann. Technol. Agric.*, Vol 29(1), 53-67.
- Dergal, S. B. (2006). Química de los alimentos. *México: BADUI DERGAL, SALVADOR.*
- Duprat, F., Gallant, D., Guilbot, A., Mercier, C., y Robin, J. P. (1980). Les polymères végétaux. *Paris, Monties.*, pp. 176-231.
- Durán-García, M. E., y Ruiz-Navas, R. A. (2020). Simulador de propiedades termodinámicas en la conversión de la biomasa forestal de aserrín de pino *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22, 347-364.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2020000300347&nrm=iso
- Febles, J. S. (2020). *OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES QUE PERMITEN UNA MEJOR EFICIENCIA TÉCNICO-ECONÓMICA EN LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DEL ALMIDÓN DE MAÍZ* Universidad de Matanzas].
- Flores, J. J., y Quiñones, J. G. (2018). Estudio de cinética en procesos termogravimétricos de materiales lignocelulósicos *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20, 221-238. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2018000202601&nrm=iso
- Franco, C., Guzmán-Cortés, D. C., y Figueroa-García, J. C. (2020). Mathematical Model for Centralized Supply Chains with Decisions Involving Shared Resources 25, 323-333. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-750X2020000300323&nrm=iso
- García, C. D., López-Castro, L. F., y Jaimes-Suárez, S. A. (2020). Selección óptima del portafolio de proyectos utilizando metaheurísticas de población y trayectoria meta-optimizadas. *Revista EIA*, 17, 271-288.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372020000200271&nrm=iso

- García, Y. B., Jiménez, M. D. M., Arbelo, O. C., Cabrera, A. R., Pérez, M. B., Pino, A. S., Torres, J. L., Vega, V. R. M., Alfonso, J. A. C., y Díaz, E. R. J. C. T. (2014). Caracterización morfológica y agronómica de cultivares cubanos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). 35(2), 43-50.
- González-Avila, I., Lopez-Vanegas, A., Rodríguez-Buitrago, J., y Marulanda-Cardona, V. (2021). ASSESSMENT OF REDUCING SUGARS PRODUCTION FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTES BY BATCH AND SEMICONTINUOUS SUBCRITICAL WATER HYDROLYSIS *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 11, 55-64. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832021000100055&nrm=iso
- Grabber, J. (2005). How do lignin composition, structure, and cross linking affect degradability. A review of cell wall model studies. *Crop Sci.*, Vol 45, 820-831.
- Gray, M., Converse, A., y Wyman, C. (2003). Sugar monomer and oligomer solubility. Data and predictions for application to biomass hydrolysis. *Appl Biochem. Biotechnol.*, 179-193.
- Gunz, T., Montilla, J., Pérez, S., y Reverón, A. (1985). La yuca o mandioca. *CIDIA San José, Costa Rica*.
- Han, M., Kim, Y., Chung, B., y Chui, G. W. (2017). Bioethanol production from optimized pretreatment of cassava stem. *Korean J ChemEng.*, Vol. 28 (1), 19-125.
- Herrera, J., y Pons, J. (2014). Sustratos Proteicos (SUSPROTEL). Aspectos Tecnológicos. . *Fórum Ciencia y Técnica. Matanzas, Cuba*.
- Herrera, L. A. V., Zamora, L. L., Reynoso, E. B., y Velázquez, O. F. I. (2020). SIMULACIÓN DINÁMICA DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE HEMICELULOSA Y PRODUCCION DE XILOSA A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.
- Holguín, P., y Elizabeth, W. (2021). Obtención de nanocristales de celulosa a partir de residuos agrícolas.

- Iglesias, O. (2016). Propuesta tecnológica preliminar para la obtención de un Sustrato Proteico (base levadura torula) a partir de tallos de yuca residuales. . *Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero químico. Universidad de Matanzas.*
- K. Olofsson, M. B. (2008). "A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks," *Biotechnol Biofuels*, vol. 1, p. 7.
- Keenan, J. H., Keyes, F. G., Hill, P. G., y Moore, J. G. (1988). Steam Tables. Edición Revolución.
- Kollie, E. (2014). *Our Cassava Feild*. Retrieved 1 de noviembre from <https://liberiamissionblog.wordpress.com/>
- Kumar, R., Singh, S., y Singh, O. V. (2018). Bioconversion of lignocellulosic biomass: Biochemical and molecular perspectives. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(5), pp.377–391.
- LABIOFAM. (2021). Balance económico. Fichas de costo.
- Lee, J. (1997). Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. . *Journal of Biotechnology*, 56(1), pp.1–24.
- Liao, W., Liu, Y., Liu, C., Wen, Z., y Chen, S. (2006). Acid hydrolysis of fibers from dairy manure. *Bioresour. Technol.*, Vol. 97, 1687 – 1695.
- Marmolejo, L. F., Pérez, A., Torres, P., Cajigas, A. A., y Cruz, C. H. (2008). Utilization of the solid wastes generated in small scale cassava starch production. . *Livestock Research for Rural Development*, 20(8).
- Marrero, Y., Galindo, J., Castillo, Y., y Ruiz, O. (2020). Development of yeast additives for feeding ruminants in Cuba *Cuban Journal of Agricultural Science*, 54, 457-469. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802020000400457&nrm=iso
- Martelo-Guzmán, J., Collazo-Bigliardi, S., y Ortega-Toro, R. (2020). Comparative Study of Active Edible Coatings Based on Yam Starch and Cassava Starch *Revista EIA*, 17, 312-325. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372020000200312&nrm=iso

- Martín, C., Wei, M., Xiong, S., y Jonsson, L. (2017). Enhancing saccharification of cassava stems by starch hydrolysis prior to pretreatment.
- Meneses, K., Santacruz, S., y Coloma, J. (2017). Cassava conservation (Manihot esculenta) with edible film based on banana peel flour. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 40, 095-104. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702017000200006&nrm=iso
- Mesa, L., González Suárez, E., Mamady Toure, B., López Bello, N., y Cortés-Martínez, R. (2021). PLANES EXPERIMENTALES AL ESTUDIAR LA HIDRÓLISIS ÁCIDA DE ASERRÍN DE PINO PARA PRODUCIR ETANOL *Centro Azúcar*, 48, 89-102. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612021000200089&nrm=iso
- Morales, J. A., Figueroa, O. A., y Zapata, J. E. (2017). Optimización de Hidrólisis Enzimática de la Fracción Globular de Sangre Bovina por Metodología de Superficie Respuesta y Evaluación de sus Propiedades Antioxidantes *Información tecnológica*, 28, 75-86. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642017000200009&nrm=iso
- Mosier, N., Wyman, C. E., Dale, B. D., Elander, R. T., Lee, Y. Y., Holtzapple, M., Ladisch, y C.M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.*, 96, 673–686.
- Niño, L., Acosta Cárdenas, A., y Gelves Zambrano, R. (2013). Evaluación de pretratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (Manihot esculenta Crantz) *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 317-326. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302013000400025&nrm=iso
- Noriega, S. (2016). Fisiología general de enzimas. *España: Universidad de Cantabria*.
- Orozco, M. B. (2015). *Proceso de sacarificación de los tallos de yuca residuales para obtener levadura Torula* Universidad de Matanzas].

- Osorio, A., Gómez, E., Ocampo, D., y Rios, L. A. (2019). Licuefacción Solvotérmica de Madera de Acacia (*Acacia mangium*) *Información tecnológica*, 30, 211-222. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000200211&nrm=iso
- Ospina-Gómez, J. O., y Ligarreto-Moreno, G. A. (2019). CARACTERIZACIÓN MORFOAGRONÓMICA DEL BANCO DE GERMOPLASMA DE FEDEARROZ-FNA EN TRES AMBIENTES DEL TRÓPICO COLOMBIANO *Agronomía Costarricense*, 43, 139-156. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242019000200139&nrm=iso
- Peña, F. (2004). Bioquímica. *México: Limusa*.
- Pérez, I. (2021). Capacitors placement in distribution systems with nonlinear load by using the variables inclusion and interchange algorithm *Dyna*, 88, 13-22. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532021000200013&nrm=iso
- Pérez, I., Teymouri, H., Alizadeh, H., y Dale, B. (2005). Understanding factors that limit enzymatic hydrolysis of biomass. *Appl Biochem. Biotechnol.*, 1081 – 1099.
- Prasad, S., Singh, A., y Joshi, H. C. (2017). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), pp. 1-39.
- Quelal, M., Nazate, K., Villacrés, E., y Cuarán, J. (2019). Obtención y caracterización de un hidrolizado proteico de quinua *Chenopodium quinoa* Willd *Enfoque UTE*, 10, 79-89. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422019000200079&nrm=iso
- Rincón, J.M., y Silva, E. (2017). Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. *Primera., Bogota, Colombia*.
- Rodríguez, S. L., y Granda, A. B. V. (2005). Simulación y optimización avanzadas en la industria química y de procesos: HYSYS. *España, Universidad de Oviedo, Oviedo*.
- Rosabal, J., y Valle, M. (2006). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. *Editorial Pueblo y Educación, Cuba., Tomo I*, pp. 100-101.

- Salazar, A. F., López, J. F., Tavizón, A., y Araiza-Vázquez, M. J. (2019). Estudio de un Algoritmo Genético para la Administración Académica *Formación universitaria*, 12, 63-72. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50062019000400063&nrm=iso
- Salgado-Ordosgoitia, R. D., Paternina-Contreras, A. L., Cohen-Manrique, C. S., y Rodríguez-Manrique, J. A. (2019). Análisis de las Curvas de Gelatinización de Almidones Nativos de tres Especies de Ñame: Criollo (*Dioscorea alata*), Espino (*Dioscorea rotundata*) y Diamante 22. *Información tecnológica*, 30, 93-102. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000400093&nrm=iso
- Sanchez, D. (2020). *OBTENCIÓN DE JARABE AZUCARADO MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA A PARTIR DE LA YUCA (Manihot esculenta)* UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR].
- Sanchez, J. (2008). Síntesis de esquemas tecnológicos integrados para la producción biotecnológica de alcohol carburante a partir de tres materias primas colombianas. *Universidad nacional de Colombia sede Manizales*.
- Sánchez, O., y Cardona, C. (2007). Producción de alcohol carburante, una alternativa para el desarrollo agroindustrial. *Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales*.
- Santana, S. (2018). *Valoración de la hidrólisis enzimática en la obtención de un concentrado proteico a partir de tallos de yuca residuales*. Universidad de Matanzas.].
- Santillán, A., Lisbeth, J., y Rodríguez, Y. C. (2021). Efecto del pH, temperatura y celulasa en la obtención de glucosa por hidrólisis enzimática de residuos sólidos orgánicos pre tratados.
- Sarkar, N. (2018). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. . *Renewable Energy*, 37(1), pp.19–27.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., y Crocker, D. (2008). Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory

- Analytical Procedure (LAP). . *Technical Report NREL/TP-510-42618. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.*
- Sun, Y., y Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review. *Bioresource and technology*, 83(1), pp.1–11.
- Turton, R., Bailie, R., Whiting, W., y Shaewitz, A. (1998). Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Science. . *New Jersey.*
- Urbina, M. A. O., Monroy, B. L. D., Barroso, C. H., y Sandoval, L. M. B. (2021). Optimización de la hidrólisis para el tratamiento de residuos lignocelulósicos con enzimas de *Aspergillus niger*. *CIENCIA EN DESARROLLO*, 12(1).
- Valverde, J. C., Arias, D., Campos, R., Jiménez, M. F., y Brenes, L. (2020). Análisis perceptual del mercado energético basado en biomasa lignocelulósica de origen arbóreo en Costa Rica. *Madera y bosques*, 26(3).
- Vargas-Vázquez, M. L. P., Uscanga-Mortera, E., Padilla-Chacón, D., Vibrans, H., Kohashi-Shibata, J., Miranda-Colín, S., y Yáñez-Jiménez, P. (2020). Asignación de biomasa y carbohidratos en semillas y plántulas de *Phaseolus coccineus* L. domesticado y silvestre *Botanical Sciences*, 98, 366-376.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982020000200366&nrm=iso
- Vedia, J. F., Huanca Lopez, S., Tejeda, L. K., Aliaga Rossel, E., Loria, J. M., y Mollinedo Portugal, P. A. (2019). Determination of the temperature, pH and concentration parameters for \pm -Amilasa Mg a new enzyme. *Revista Boliviana de Química*, 36, 51-59.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602019000100005&nrm=iso
- Villanueva, A. R. G., Céspedes, C. G., de Armas Martínez, A. C., Carvajal, Y. A., y Ramos, G. V. (2020). Valorización de la lignina en el concepto de biorrefinería (I). *Revista Centro Azúcar*, 47(3), 95-105.

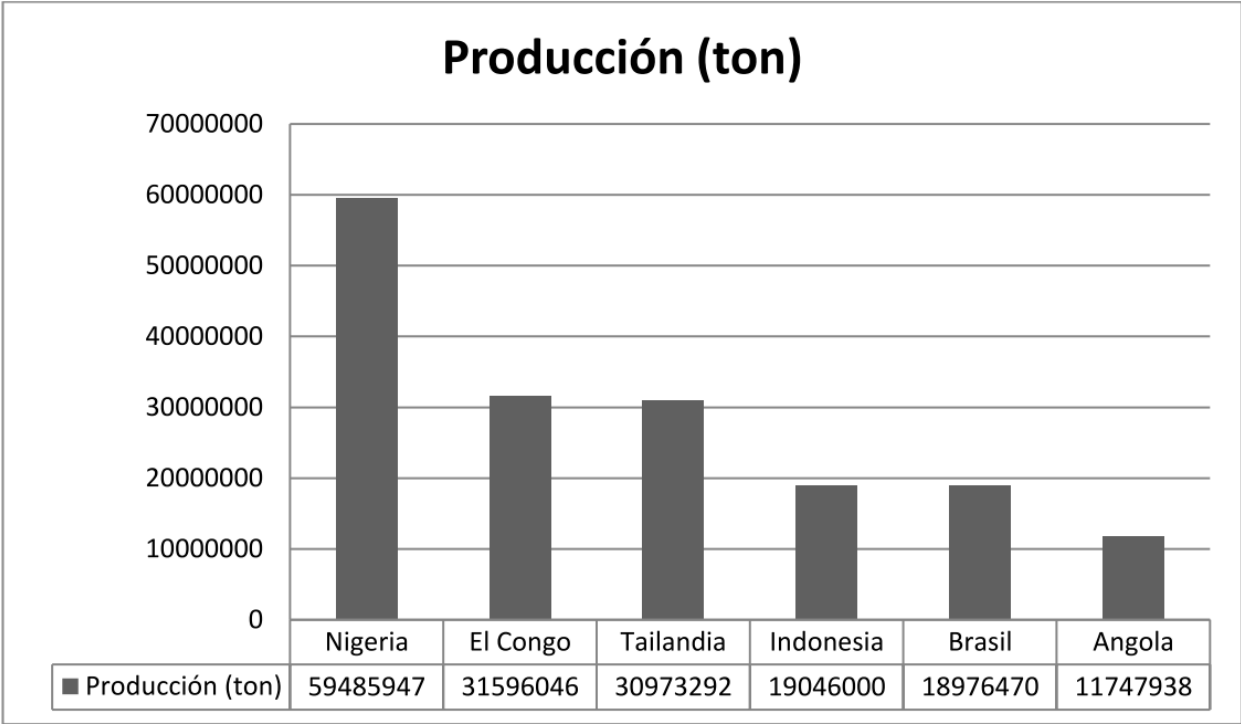
- Xu, F., Sun, J., Liu, F., y Sun, R. (2006). Comparative study of alkali and acidic organic solvent soluble hemicellulosic poly saccharides from sugarcane bagasse. *Carbohydr. Res.*, Vol. 341, 253 -261.
- Yan, S., , L., J., Chen, X., Wu, J., Wang, P., Ye, J., y Yao, J. (2011). Enzymatical hydrolysis of food waste and ethanol production from the hydrolysate. *Renewable Energy*, 36(4). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.020>
- Zapata, J. E., Moya, M., y Figueroa, O. A. (2019). Hidrólisis Enzimática de la Proteína de Vísceras de Trucha Arco Íris (*Oncorhynchus mykiss*): Efecto del tipo de Enzima, Temperatura, pH y Velocidad de Agitación *Información tecnológica*, 30, 63-72. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000600063&nrm=iso
- Zhu, W., Wei, M., Xie, G., Lestander, T., y Xiong, S. (2015). Cassava stem wastes as potential feedstock for fuel ethanol production: A basic parameter study.

Anexos:**Anexo 1: Propiedades de los componentes del almidón.**

| Propiedad | Amilosa | Amilopectina |
|--|------------------------------|----------------------|
| Estructura | Lineal | Ramificada |
| Longitud promedio de la cadena | Aprox. 1 000 | 20-25 |
| Peso molecular | 40 000 hasta 10^6 | 200 000 hasta 10^9 |
| Grado de polimerización | Aprox. 1 000 | 10 000–100 000 |
| En solución | Hélice extendida o enrollada | Esfera irregular |
| Estabilidad en soluciones acuosas | Retrógrada | Estable |
| Acomplejamiento | Con facilidad | Con dificultad |
| Retrogradación | Rápida | Muy lenta |
| Gel | Firme e irreversible | Suave y reversible |
| Formación de complejos | Favorable | Suave y reversible |
| Patrón de rayos X | Cristalino | Amorfo |
| Digestibilidad de la β-amilasa | Casi completa | Cerca de 60 % |
| Reacción con yodo | 19-20 % | 5-9 % |
| Color con la solución de yodo | Azul profundo | Violeta |
| Longitud de onda máxima (nm) | Aprox. 660 | 530-550 |

Fuente: Aspinal (1983).

Anexo 2: Producción de yuca en el mundo.



Fuente: Axayacatl (2018).